



IPS Instituto
Politécnico de Setúbal
**Escola Superior de
Tecnologia de Setúbal**

DIOGO MIGUEL
REBELO
BARROSO

Tecnologias de carregamento sem fios

Dissertação submetida como requisito parcial
para obtenção do grau de **Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
– Ramo de Energias Renováveis e Sistemas
de Potência**

Orientadores:

Professor Doutor Armando José Pinheiro Marques
Pires

Professor Doutor Vítor Manuel de Carvalho Fernão
Pires

Professora Doutora Elena Nikolaevna Baikova

Júri:

Presidente Doutor Filipe Duarte dos Santos
Cardoso

Arguente Doutor Daniel José Medronho Foito

Orientador Doutor Victor Manuel de Carvalho
Fernão Pires

Maio de 2021

Resumo

O facto de a energia eléctrica ser um tópicó de discussão global, faz com que a transmissão de energia sem fios torne-se cada vez mais relevante devido às vantagens que esta apresenta nas suas aplicações. Nesta dissertação é estudado e implementado um modelo de um circuito de transferência de energia sem fios através de uma simulação computacional e um protótipo preparado para fazer a transmissão de energia sem fios por acoplamento indutivo ressonante. A parte fundamental do sistema proposto integra dois pares ressonantes de condensadores e bobinas. O circuito de potência utilizado baseia-se numa ponte H utilizada normalmente para motores de corrente contínua. Para o controlo aplicado à ponte H é utilizada uma função oscilante presente no Arduino cuja frequência de oscilação pode ser regulada de acordo com a frequência de ressonância do circuito.

Foram feitas as aquisições de resultados em contexto experimental, os quais são comparados com a simulação realizada no programa MATLAB, respeitando as condições da topologia inicialmente escolhida.

Palavras-chave: Acoplamento indutivo ressonante, Carregamentos sem fios, Circuito oscilante, frequência de ressonância.

Abstract

The fact that electrical energy is a topic of global discussion, makes wireless energy transmission increasingly relevant due to the advantages it presents in its applications. In this thesis, a model of a wireless energy transfer circuit is studied and implemented through a computer simulation and a prototype prepared for wireless energy transmission by inductive resonant coupling. The fundamental part of the proposed system integrates two resonant LC circuit. The power circuit used is based on an H-bridge normally used for direct current motors. For the control applied to bridge H, an oscillating function present in the Arduino is used, whose oscillation frequency can be regulated according to the resonant frequency of the circuit.

The acquisitions of results were made in an experimental context and compared with the study carried out in the MATLAB program, respecting the conditions of the initially chosen topology.

Key-words: Resonant Inductive Coupling, Wireless Charges, Oscillating Circuit, Resonant Frequency.

Índice

Resumo	ii
Abstract	iii
Índice	iv
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	x
Lista de Siglas e Acrónimos	xi
Capítulo 1	13
Introdução	13
1.1. Preâmbulo	13
1.2. Objetivos	14
1.3. Estrutura	14
Capítulo 2	17
Tecnologia de WPT	17
2.1. História	17
2.2. Tipos de tecnologias de WPT	18
2.2.1. Métodos do campo próximo	19
2.2.2. Métodos do campo distante	20
2.2.3. Comparação entre os métodos	21
2.3. Aplicações ao nível da eletrónica de consumo	23
2.3.1. Telemóveis	23
2.3.2. RFID	23
2.4. Mobilidade elétrica (VE)	24
2.4.1. Carregamento sem fios doméstico	26
2.4.2. Exemplo dos Táxis de Nottingham	27
2.4.3. Carregamento sem fios dinâmico	28
2.5. Aplicações médicas	29
2.5.1. Implante coclear	30
2.5.2. Implantes de nervos periféricos	31
2.6. Diferentes topologias de Acoplamento indutivo ressonante	31
2.6.1. Acoplamento indutivo não ressonante.	32
2.6.2. Acoplamento indutivo ressonante (2 bobinas)	32
2.6.3. Acoplamento indutivo ressonante (4 bobinas) e Fator de Qualidade	36

Capítulo 3.....	39
Conceção do protótipo.....	39
3.1. Introdução	39
3.2. Estudo teórico do protótipo	39
3.2.1. <i>Circuito ressonante.....</i>	40
3.2.2. <i>Inversor.....</i>	43
3.2.3. <i>Ponte de díodos.....</i>	44
3.2.4. <i>Conversor CC-CC elevador.....</i>	45
3.3. Simulação.....	46
3.3.1. <i>Inversor e Arduíno</i>	47
3.3.2. <i>Retificador</i>	49
3.4. Montagem	50
Capítulo 4.....	53
Resultados Experimentais	53
4.1. Introdução	53
4.2. Construção do protótipo	53
4.2.1. <i>Montagem do circuito ressonante.....</i>	53
4.2.2. <i>Arduíno e montagem do circuito oscilador</i>	54
4.2.3. <i>Inversão do sinal do circuito oscilador</i>	56
4.2.4. <i>Montagem da ponte H</i>	59
4.2.5. <i>Montagem do retificador</i>	62
4.3. Resultados Obtidos	64
Capítulo 5.....	75
Conclusões	75
5.1. Consideração finais.....	75
5.2. Implicações pessoais	76
5.3. Limitações ao estudo.....	76
5.4. Trabalho futuro.....	76
Anexo 1.....	77
Fundamentos Teóricos	77
Leis de Maxwell.....	77
Magnetismo	78
<i>Força magnética.....</i>	78

<i>Campo magnético</i>	79
<i>Permeabilidade magnética</i>	81
<i>Lei de Faraday</i>	82
<i>Lei de Lenz</i>	83
Bobinas	84
<i>Coefficiente de autoindução</i>	84
<i>Coefficiente de autoindução de uma bobina</i>	84
<i>Indução mútua</i>	86
<i>Coefficiente de acoplamento magnético</i>	87
<i>Ressonância</i>	87
<i>LC Série</i>	87
Anexo 2	89
Código Arduino	89
Referências	93
Bibliográficas	93

Lista de Figuras

Figura 1 - Estação de carregamento de telemóveis. [15].....	13
Figura 2 - Várias tecnologias de WPT.....	18
Figura 3 - Exemplos de métodos de campo próximo. [17]	19
Figura 4 - Exemplo de métodos de campo distante. [17]	20
Figura 5 – Robô elevador vencedor da competição. [9]	21
Figura 6 – Espectro eletromagnético. [5].....	22
Figura 7 - Comparação de eficiência entre várias técnicas de WPT. [16].....	22
Figura 8 - Telemóvel sendo carregado por carregador sem fios. [13].....	23
Figura 9 - Componentes de um sistema RFID. [12].....	24
Figura 10 – Várias etapas de WPT para VE. [18]	25
Figura 11 - WPT doméstico de um VE. [6].....	26
Figura 12 – Aplicação de WPT. [7].....	27
Figura 13 – Táxi elétrico em carregamento sem fios. [8].....	28
Figura 14 – Estrada de carregamento sem fios dinâmica. [9].....	28
Figura 15 - Implante Coclear. [2]	30
Figura 16 - Descrição da implementação do implante. [2].....	31
Figura 17 – Diferentes topologias de acoplamento indutivo ressonante.	32
Figura 18 – Topologia existentes em acoplamento indutivo ressonante (2 bobinas).	33
Figura 19 – Gráfico de qualidade da bobina. [19].....	37
Figura 20 – Profundidade de penetração. [16]	38
Figura 21 – Esquema completo do circuito de WPT.....	40
Figura 22 – Esquema o circuito ressonante.	41
Figura 23 – Forma de onda na saída do inversor.....	43
Figura 24 - Esquema generalizado de uma ponte H. [I10]	44
Figura 25 - Onda resultante após filtragem com condensador. [I11]	45
Figura 26 - Esquema do circuito CC Boost.....	45
Figura 27 - Exemplo de onda quadrada utilizada no interruptor do CC Boost.	46
Figura 28 - Circuito WPT Matlab.....	47
Figura 29 - Esquema inversor + circuito oscilante	48
Figura 30 – Tensão de saída no inversor e tempos mortos.....	49
Figura 31 - Bloco retificador + filtro.	49

Figura 32 - Tensão de saída na carga.	50
Figura 33 – Esquema do circuito realizado em EasyEDA	50
Figura 34 - LCD utilizado.	55
Figura 35 - Esquema de montagem do LCD e Arduíno.....	55
Figura 36 - Saída onda quadrada do Arduíno.	56
Figura 37 - Esquema da porta NOR e respetiva tabela de verdade.	57
Figura 38 - Esquema de ligação da porta NOR (HEF4001).	57
Figura 39 - Esquema de ligação da porta NOR.....	58
Figura 40 - Saída da porta NOR.....	58
Figura 41 - Circuito de ligação do L293D.	59
Figura 42 - Esquema de montagem do L293d.	60
Figura 43 – Dissipador de calor do L293d.....	60
Figura 44 - Saída do L293D sem carga.....	61
Figura 45 - Saída do L293D com carga	62
Figura 46 - Circuito Rx	62
Figura 47 - Saída do retificador.....	63
Figura 48 – Montagem do modelo	64
Figura 49 – Aparelhos de medida utilizados	65
Figura 50 – Variação de distância entre bobinas.....	66
Figura 51 – Variação de desvio entre bobinas	66
Figura 52 – Suporte de acrílico utilizado	67
Figura 53 – Suporte de acrílico com bobinas	67
Figura 54 – Ensaio experimental.....	68
Figura 55 – Gráfico de potência para 0 cm de desvio	71
Figura 56 - Gráfico de potência para 0,25 cm de desvio.....	72
Figura 57 - Gráfico de potência para 0,25 cm de desvio.....	72
Figura 58 - Representação das linhas do campo magnético.....	78
Figura 59 - Representação da regra da mão direita [I4]	79
Figura 60 - Representação da direção do campo magnético	80
Figura 61 - Representação da direção do campo magnético quando um fio é percorrido por uma corrente elétrica.....	81
Figura 62 - Representação da lei de Lenz	83
Figura 63 - Representação de uma bobina com n número de espiras	85

Figura 64 - Circuito LC série 88

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Comparação dos métodos [3]	21
Tabela 2 – Especificações do Sistema da Qualcomm	29
Tabela 3 – Características das bobinas.....	54
Tabela 4 – Tabela de resultados 1	69
Tabela 5 - Tabela de resultados 2.....	69
Tabela 6 - Tabela de resultados 3.....	70
Tabela 7 - Tabela de resultados 4.....	70
Tabela 8 - Tabela de potência para diferentes parâmetros	71

Lista de Siglas e Acrónimos

RFID	“Radio Frequency identification” – Identificação por Rádio Frequência
Rx	“Receiver” – Recetor
Tx	“Transmitter” - Transmissor
VE	Veículos elétricos
WPT	“Wireless Power Transfer” – Transferência de energia sem fios

Lista de Símbolos

A	Área [m ²]
B	Campo magnético [T]
C	Capacidade [F]
Φ	Fluxo magnético [Wb]
L	Indutância [H]
f	Frequência [Hz]
m	Metro [metros]
V	Tensão [Volts]
I	Corrente [A]
P	Potência [W]

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo são apresentados os aspetos gerais da temática em estudo. Será enquadrado o tema deste trabalho, os objetivos a atingir e a linha de investigação seguida. É ainda é descrita a forma como o texto está organizado.

1.1. Preâmbulo

Estima-se que em 2021 existem 4,88 mil milhões de utilizadores de telemóveis, o que representa cerca de 62% da população mundial [1] um número que cresce constantemente. A dependência desta ferramenta tem-se tornado cada vez mais prevalente devido à sua diversidade de funções e acessibilidade.

A autonomia destes aparelhos, é na maior parte dos casos, menor que um dia. Tornando-se difícil manter ativo o aparelho sem qualquer dispositivo de carregamento acessório [2]. Com a proliferação de veículos elétricos e aparelhos biomédicos eletrónicos, a utilização da tecnologia de transferência de potência sem fios, bem como o seu desenvolvimento, tornaram-se mais relevantes., permitindo aumentar os níveis de conforto bem como obter maior independência energética dos diversos aparelhos.

A temática da tecnologia de carregamento sem fios, refere-se à transferência de energia de uma fonte de alimentação para um local onde será, ou não, armazenada sem necessidade de contacto elétrico ou físico.

A Figura 1 representa um exemplo de um sistema de transferência de energia (WPT) em telemóveis.



Figura 1 - Estação de carregamento de telemóveis. [I5]

Carregamento indutivo é o tipo de tecnologia de WPT mais popular para carregamento de telemóveis. Os tipos de tecnologias de WPT serão abordados com maior detalhe no capítulo segundo. O padrão de interface “Qi”, desenvolvido pela empresa Wireless Power Consortium, é hoje utilizado com vários fabricantes que pretendem utilizar a tecnologia de WPT no seu produto.[3]

1.2. Objetivos

O objetivo primário desta tese, é o estudo e desenvolvimento detalhado da tecnologia transferência de potência sem fios.

Esta tecnologia terá o seu foco essencialmente no método de campo próximo: acoplamento indutivo ressonante, utilizando-se também uma forte componente prática laboratorial de modo a consolidar os aspetos teóricos fundamentais sobre a tecnologia.

A temática enquadra-se no amplo campo de sistemas de potência, engenharia eletrotécnica e eletromagnetismo.

1.3. Estrutura

A escrita e estrutura deste documento foram feitas de modo a conseguir uma linguagem organizada e clara, proporcionado ao leitor uma fácil compreensão. O documento está dividido nos seguintes capítulos.

- Capítulo 1 Introdução.
- Capítulo 2 Tecnologia de WPT.
- Capítulo 3 Conceção do protótipo.
- Capítulo 4 Simulação e implementação do protótipo.
- Capítulo 5 Ensaio experimentais.
- Capítulo 6 Considerações finais.

No capítulo 1 é feita uma introdução à temática da dissertação, são também apresentados os objetivos gerais e a estrutura utilizada no documento. No capítulo 2 discute-se a tecnologia, o seu desenvolvimento ao longo da história e alguns casos onde esta é aplicada. No capítulo 3, é descrita a conceção do protótipo, propondo-se e analisando-se um modelo e as suas propriedades. No capítulo 4, é apresentada uma simulação em

Simulink, utilizando como base o modelo previamente proposto. Esta simulação será de grande importância quando for necessário efetuar uma comparação com os resultados na obtidos na fase experimental.

No capítulo 5, são descritos detalhadamente os passos tomados para a montagem do protótipo e os resultados obtidos durante esta fase. É também feita uma comparação com os resultados previamente adquiridos durante a simulação do mesmo modelo de circuito no programa MATLAB.

No capítulo 6, são apresentadas as considerações finais e discute-se o possível trabalho futuro a desenvolver.

Fundamentos teóricos necessários para o estudo e construção do protótipo e código utilizado encontram-se nos **Anexos** no fim do documento.

Capítulo 2

Tecnologia de WPT

A tecnologia WPT já existe há várias décadas, por exemplo, na forma de comunicações por satélite, em rádio frequência, (RFID). A maioria destas tecnologias consiste em transferência de potências na ordem de microwatt. Para elevadas potências o mais comum é a utilização de acoplamento indutivo demonstrado por Nikola Tesla há mais de um século. Tesla demonstrou a possibilidade de transferência de energia sem fios iluminando lâmpadas através da sua invenção denominada “bobina de Tesla” [4] . Estas experiências permitiram o avanço tecnológico na área de transferência de energia sem fios.

2.1. História

A história do carregamento sem fios, apesar das dificuldades na sua aplicação comercial, possui projetos com grande interesse e os seus avanços tecnológicos têm vindo a tornar-se cada vez mais viáveis.

Embora já fosse possível observar os efeitos de fenómenos elétricos e magnéticos na antiguidade, foi apenas a partir do século XIX que ambos foram relacionados com o aparecimento da teoria sobre o eletromagnetismo.

Em 1864 o professor e investigador na universidade de Cambridge, James Clerk Maxwell, publicou o artigo “The Dynamic Theory of Electromagnetic Fields”, no qual dispunha de equações que clarificavam a teoria do eletromagnetismo. [A1]

Nikola Tesla, inspirado nos trabalhos de Hertz iniciou a sua própria pesquisa dentro da temática. Em 1891 o famoso *Tesla coil* foi patenteado, e com ele fez várias demonstrações de alimentação a sistemas de iluminação, particularmente em 1893 na exposição colombiana na Feira Mundial de Chicago. Tesla rapidamente ambicionou um projeto que visionava a distribuição de energia sem fios, a distâncias arbitrárias por meio da construção de várias torres na superfície terrestre. Para realizar este projeto, Tesla mudou a localização do seu laboratório para *Colorado Springs* para estudar a condutividade da atmosfera terrestre.

No início dos anos 1960 a tecnologia foi aplicada a dispositivos médicos implantados com sucesso [5] , tais como dispositivos marca-passos e corações artificiais. Atualmente muitos destes dispositivos médicos são eletricamente alimentados pelo método de

acoplamento indutivo ressonante [6] , dispensando a troca de baterias internas, e consequentemente, cirurgias para a sua substituição.

Em 1964, William C. Brown fez uma demonstração com um pequeno helicóptero, que convertia micro-ondas enviadas por antenas em energia elétrica para o seu funcionamento.

Em 1975, conseguiu utilizar a mesma tecnologia para transmitir energia a uma distância de 1,6km com uma eficiência de 84%.

Em 2010 foi solicitada uma patente da tecnologia WPT pela empresa *Apple Inc.* [7]

2.2. Tipos de tecnologias de WPT

A tecnologia de WPT pode ser dividida através dos seguintes métodos representados na Figura 2 nomeadamente, campo distante, que envolve a emissão de energia na faixa desde os 3GHz até aos 7,5PHz e é utilizado em grandes distâncias. Os métodos de campo próximo são utilizados em distâncias menores de 1m e envolvem técnicas indutivas [8] . Na Figura 2 está representado um esquema com os vários tipos de tecnologias de WPT existentes.

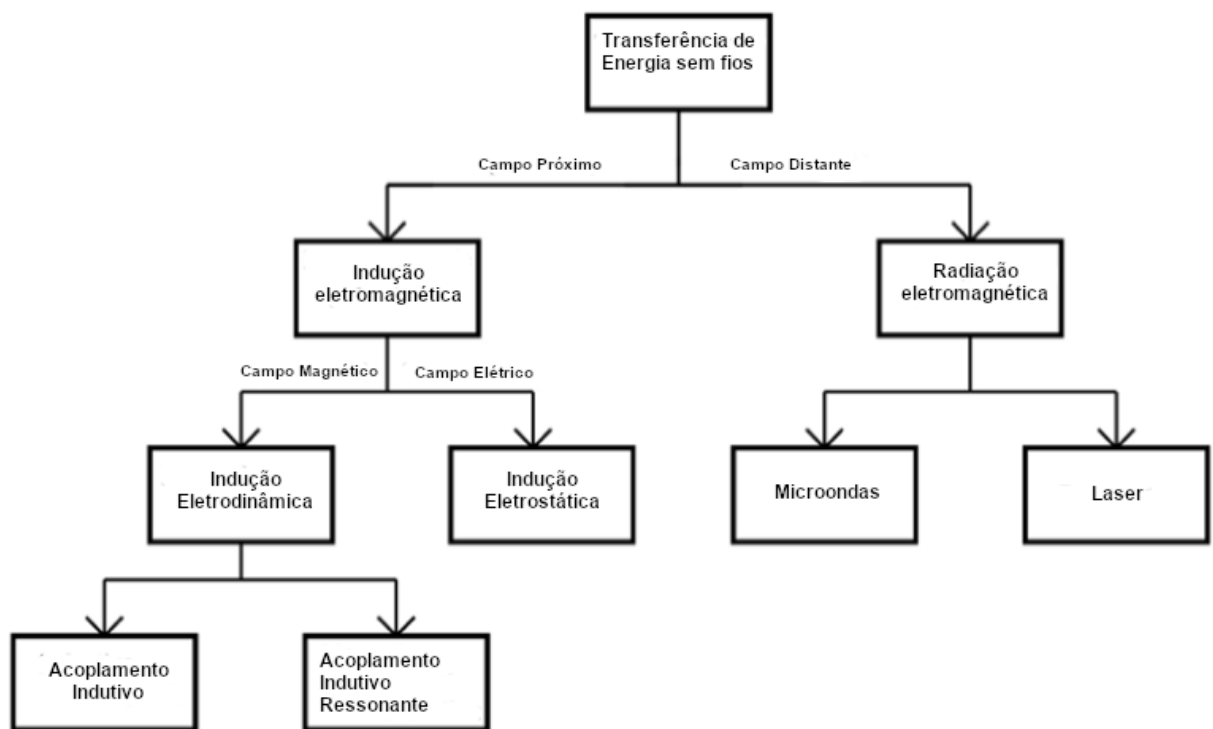


Figura 2 - Várias tecnologias de WPT.

2.2.1. Métodos do campo próximo

A Figura 3 representa exemplos de configurações utilizadas no método de campo próximo.

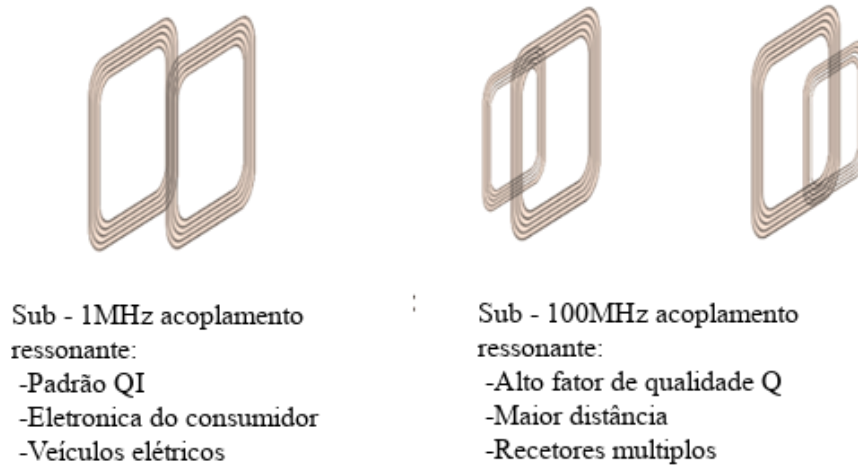


Figura 3 - Exemplos de métodos de campo próximo. [17]

Os métodos denominados de campo próximo decompõem-se os seguintes:

- **Acoplamento indutivo** – Presente no funcionamento base de um transformador, sendo a energia transferida do primário para o secundário sem contacto físico elétrico. Esta tecnologia é comum no carregamento de baterias de telemóvel e escovas de dentes elétricas.
- **Acoplamento capacitivo** – A energia é transmitida entre as duas placas metálicas (elétrodos) de um condensador. Esta tecnologia é utilizada em sistemas de alimentação de sensores.
- **Acoplamento indutivo ressonante** – Muito semelhante ao acoplamento indutivo, utiliza, no entanto, um circuito ressonante entre as duas bobinas o que permite distância maiores entre o transmissor (Tx) e receptor (Rx). Esta tecnologia está presente no carregamento das baterias de (VE) e posteriormente será estudada com maior detalhe.

2.2.2. Métodos do campo distante

A Figura 4 representa exemplos de dois métodos de campo distante e algumas características.

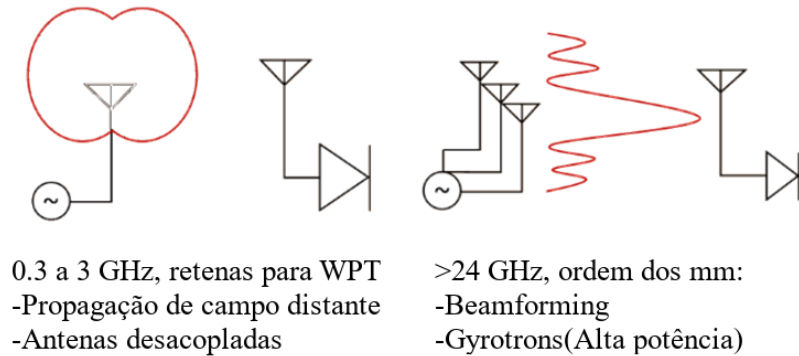


Figura 4 - Exemplo de métodos de campo distante. [I7]

Os diversos métodos denominados de campo distante decompõem-se nos seguintes

- **Micro-ondas** – Esta técnica permite transferência energética a uma distância superior aos métodos de campo próximo. A tecnologia consiste num conversor de energia elétrica para micro-ondas, um conversor de micro-ondas para energia elétrica, uma antena para transmissão e outra de receção. Este método ainda apresenta um custo muito elevado na sua utilização
- **Laser** – Consiste na utilização de um conversor de energia elétrica para luz e um recetor. O laser apresenta elevada densidade de energia por isso é ideal para transferência de energia a longas distâncias. A tecnologia neste momento é tão eficiente quanto o recetor, ou seja, está limitada pela eficiência do painel fotovoltaico recetor.

Como exemplo de aplicação da tecnologia Laser refira-se, a equipa “Laser Motive” que participou e saiu vencedora de um evento organizado pela NASA a 9 de novembro de 2009 que se encontra representada na Figura 5. O evento consistiu na apresentação de tecnologias de elevadores espaciais. A equipa vencedora criou um robô eletrificado pela tecnologia Laser. A parte de energia do robô era constituída por uma célula fotovoltaica e nela incidia um laser que a alimentava. Com isto foi possível o robô subir 900 metros de cabo em apenas 3 minutos e 48 segundos. [10]



Figura 5 – Robô elevador vencedor da competição. [9]

2.2.3. Comparação entre os métodos

Na Tabela 1 apresenta-se uma comparação entre os métodos existentes, permitindo-se identificar as vantagens e desvantagens entre eles.

Tabela 1 – Comparação dos métodos [3]

	PROXIMO			DISTANTE	
	Acoplamento indutivo	Acoplamento capacitivo	Acoplamento indutivo ressonante	Micro-ondas	Laser
Potência	de W a KW	até 1 W	de W a kW	até 20 de kW	MW
Frequência	10 kHz	100 kHz	100 MHz	300GHz	1 THz
Distância	ordem dos cm	ordem dos mm	ordem dos m	ordem dos km	ordem dos km

Com a utilização de ondas de alta frequência surge a possibilidade de transferir mais energia. Porém, as ondas são mais facilmente difratadas e atenuadas por obstáculos devido à diminuição dos respectivos comprimentos de onda, como está representado na Figura 6. É necessário ter em conta o tipo de material utilizado para que a qualidade de transmissão não seja prejudicada.

Apesar dos métodos de campo distante apresentarem bons resultados, têm um propósito

mais específico devido às suas limitações na propagação.

A qualidade da propagação das ondas eletromagnéticas é um aspeto importante na maximização da potência transferida entre emissor e recetor. A energia é transferida na forma de ondas eletromagnéticas, propagando-se à velocidade da luz.



Figura 6 – Espectro eletromagnético. [5]

Com a deterioração da qualidade da propagação das ondas eletromagnéticas, a sua eficiência a diminuir com o aumento da frequência. A Figura 7 representa um gráfico que faz a comparação da eficiência dos dois diferentes métodos em relação à distância de transmissão.

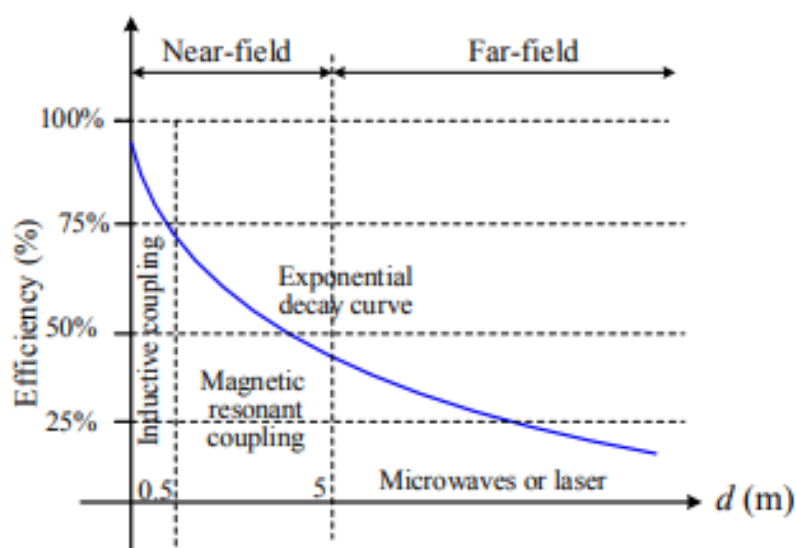


Figura 7 - Comparação de eficiência entre várias técnicas de WPT. [16]

2.3. Aplicações ao nível da eletrónica de consumo

A tecnologia de carregamento sem fios em dispositivos eletrónicos móveis como telemóveis, computadores portáteis, controladores de jogos, ratos, teclados, etc. Permite a eliminação de cabos e aumenta o conforto do utilizador, sendo o processo de carregamento, praticamente automático.

2.3.1. Telemóveis

De momento, o carregamento sem fios é uma tecnologia adequada apenas a um pequeno número de dispositivos, no entanto, é uma tecnologia que já faz parte de nossas vidas e estará cada vez mais presente.

Este recurso passou a fazer parte dos *smartphones* pela primeira vez em 2012, proporcionando ao utilizador maior conforto em troca de um tempo de carregamento maior devido ao método ser ineficiente. Empresas como a Xiaomi tem vindo a desenvolver a tecnologia, criando um transmissor móvel que faz o alinhamento automático com o recetor. Encontra-se representada a tecnologia WPT em telemóveis na Figura 8.



Figura 8 - Telemóvel sendo carregado por carregador sem fios. [I3]

2.3.2. RFID

A tecnologia de identificação por radiofrequência ou RFID possui uma ampla gama de aplicações, desde a identificação de pessoas, animais ou materiais, sendo-lhes associado uma etiqueta com um código único que permite a sua distinção.

Quando comparada a outras tecnologias, o RFID apresenta vantagens tais como, uma

maior distância de leitura, não sendo necessária uma fonte de energia externa, possuindo uma capacidade de armazenamento de informação maior que os restantes [18] .

Uma outra vantagem é que as informações contidas na etiqueta têm a possibilidade de ser modificadas ao longo do tempo de vida do objeto.

O sistema RFID é composto pelos seguintes componentes representados na Figura 9:

- Etiqueta;
- Antena;
- Leitor;
- Servidor e base de dados;

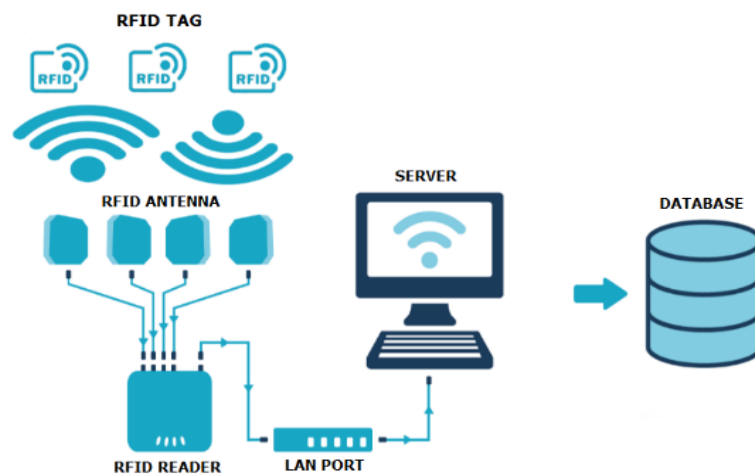


Figura 9 - Componentes de um sistema RFID. [12]

Apos a aproximação da etiqueta à antena, através de acoplamento indutivo ressonante, esta recebe energia que permite o seu funcionamento, e assim se inicia o processo de identificação.

2.4. Mobilidade elétrica (VE)

Os veículos elétricos puros são alimentados por baterias. Apesar do seu desenvolvimento crescente este conceito não é novo e existe desde o século XIX, porém com a invenção do motor a combustão, os VE saíram de produção e perderam popularidade devido à sua autonomia muito limitada. Recentemente, com o desenvolvimento das baterias de íões de lítio, os VE têm vim a tornar-se um substituo para os carros tradicionais com motor a combustão. Estes têm também muito apoio devido ao facto de terem zero emissões [21] .

O carregamento de baterias destes veículos representa um papel fundamental no seu desenvolvimento. A velocidade de carregamento e a autonomia são dois dos fatores que perdem para o carro tradicional. A tecnologia de carregamento sem fios já está a ser implementada em muitos dos veículos elétricos e pode ser um modo de proporcionar ao utilizador tanto conforto como uma maior autonomia.

O uso da tecnologia de carregamento sem fios em VE pode ser dividido em 4 áreas:

- Uso doméstico
- Parques de estacionamento
- Zonas de estacionamento
- Uso dinâmico

A instalação destas tecnologias está organizada por estas etapas. Cada uma apresenta diferentes obstáculos a superar. Estas etapas encontram-se representadas na Figura 10.



Figura 10 – Várias etapas de WPT para VE. [I8]

A etapa do uso doméstico já foi superada por várias empresas como *Evatran* e *Witricity*. Consistem em instalar um carregador sem fio numa residência de modo que o veículo elétrico carregue automaticamente enquanto estacionado.

A segunda etapa será instalar esta tecnologia em parques de estacionamento onde irá permitir ao carro carregar a sua bateria automaticamente num estacionamento.

A terceira etapa seria adaptar esta tecnologia para zonas comuns de estacionamento.

E a quarta etapa será o uso a instalação desta tecnologia em estradas para o carregamento dinâmico do veículo. Enquanto o carro percorre uma estrada ou está parado num semáforo

ele carrega a sua bateria automaticamente.

A maior parte destas tecnologias ainda estão em desenvolvimento, e será preciso um grande investimento económico para instalação das mesmas.

2.4.1. Carregamento sem fios doméstico

A BMW começou a desenvolver em 2017 carregamento sem fio para os veículos elétricos da BMW da série 5 *iPerformance*.

O condutor alinha o carro com a placa de carregamento que tem na garagem e ao desligar o carro o carregamento inicia automaticamente, não existindo a necessidade da ligação a uma tomada. Um carregamento completo tem uma duração de aproximadamente 3 horas e meia. Após o carregamento iniciar o condutor pode monitorizar o estado da bateria de maneira remota através de um *smartphone*. Este processo encontra-se retratado nas Figura 11 e Figura 12.



Figura 11 - WPT doméstico de um VE. [6]



Figura 12 – Aplicação de WPT. [7]

2.4.2. Exemplo dos Táxis de Nottingham

A cidade de Nottingham recebeu uma subvenção governamental de 3,4 milhões de libras para o teste de carregamento sem fios para os seus táxis. A última geração de táxis elétricos será equipada com um kit de carregamento sem fios para que eles possam recarregar as baterias quando estão estacionados em *stand-by*. As infraestruturas de carregamento estão a ser instaladas em postos de táxi selecionados de Nottingham, para que os taxistas possam carregar as baterias do táxi enquanto esperam por pessoas. Para começar, apenas 10 táxis serão equipados com o *hardware*, com possível expansão se for considerado bem-sucedido.

É esperado que ajude a reduzir as emissões urbanas, eliminar a quantidade de cabos presentes na via pública e acelerar a mudança para a eletrificação. Na Figura 13 encontra-se representado este exemplo.



Figura 13 – Táxi elétrico em carregamento sem fios. [8]

2.4.3. Carregamento sem fios dinâmico

A *Qualcomm* deu os primeiros passos no carregamento sem fio de veículos elétricos dentro da fase de carregamento dinâmico, tendo construído uma estrada de 100 metros com um sistema de carregamento dinâmico embutido de 20kW. A tecnologia permite ao veículo manter o estado de carregamento até uma velocidade de 110 km/h com 2 veículos em simultâneo [9] . Esta tecnologia está representada na Figura 14.



Figura 14 – Estrada de carregamento sem fios dinâmica. [9]

A ideia não seria chegar a um carregamento completo das baterias ao fim de 100 metros, mas sim utilizar a energia recebida enquanto o veículo percorre o percurso dos 100 metros.

Esta ideia é uma alternativa para aumentar a autonomia de um veículo elétrico sem modificar a capacidade da bateria.

Para que os veículos elétricos possam usufruir desta tecnologia deverão utilizar os recetores dedicados produzidos pela *Qualcomm Halo* que, por sua vez, podem ser utilizados em estações de carregamento estático pois têm uma frequência de ressonância de 85 kHz que é a frequência típica de carregamento.

A tecnologia promete, mas o grande desafio será integrar esta tecnologia nas estradas atuais. O preço seria muito elevado para este tipo de instalação. Também é justo questionar se este tipo de investimento é economicamente viável, visto que, a utilização de VE atualmente ainda é bastante reduzida.

Na Tabela 2 são representadas as especificações do sistema Qualcomm:

Tabela 2 – Especificações do Sistema da Qualcomm

Especificações	
Potência máxima	20 kW
Velocidade máx.	110 km/h
Toler. Alinhamento	200 mm
Tamanho da bobina	350 x 600 mm
Frequência op.	85 kHz
Distância máxima	175 mm

2.5. Aplicações médicas

Implantes biomédicos têm uma longa história, sendo que o início do seu desenvolvimento começou por volta de 1950. Por volta desta data foi realizada a primeira implantação de um pacemaker que funcionou por apenas 3 horas.

O termo abarca uma multiplicidade de dispositivos destinados a realizar uma das seguintes funções [14] :

- Reabilitação;
- Diagnóstico;
- Identificação;

- Medição;

No caso de reabilitação os pacientes possuem uma deficiência sensorial ou motora, e estes implantes permitem melhorar a sua qualidade de vida.

Em casos de diagnóstico, uma compreensão clara de sintomas corporais pode ser muito importante e, por vezes até crucial. Aparelhos de diagnóstico convencionais como, raio-X ou ultrassom, fornecem informações importantes, mas com uma resolução temporal limitada. A instalação de um implante sensorial, permite leituras contínuas de vários parâmetros corporais de um paciente.

Estes implantes necessários para terapias requerem uma fonte de energia externa para a sua operação devido à sua natureza elétrica. A alimentação destes dispositivos pode ser feita através de baterias, ou de energia eletromagnética dependendo da sua potência. No caso da bateria, a sua substituição ou carregamento torna-se inevitável apesar da sua grande autonomia nestes sistemas.

2.5.1. Implante coclear

Este tipo de implante terapêutico (representado na Figura 15) é profusamente utilizado para restaurar a audição em pessoas com deficiência auditiva com grande taxa de sucesso. A unidade externa do implante consiste num microfone e um processador de áudio colocado por trás do ouvido. O elemento interno estimula os restantes nervos presentes na cóclea. A alimentação da unidade externa é feita através de uma pilha enquanto a unidade interna, devida à sua baixa potência, tanto a comunicação como a alimentação são realizadas através de acoplamento indutivo.



Figura 15 - Implante Coclear. [2]

2.5.2. *Implantes de nervos periféricos*

Os implantes aplicados ao sistema nervoso periférico possibilitam o restauro de função motora ou sensorial quando existe algo que impossibilite esta comunicação. Neste caso a abordagem é guardar o sinal nervoso onde existe tecido nervoso associado ao músculo em questão, e transmitir este sinal para o músculo.

Ambos os implantes internos são alimentados por acoplamento indutivo pelo estimulador externo, enquanto este é alimentado por uma bateria. A potência deste sistema pode chegar aos 100mW [14]. Este exemplo está esquematizado na Figura 16.

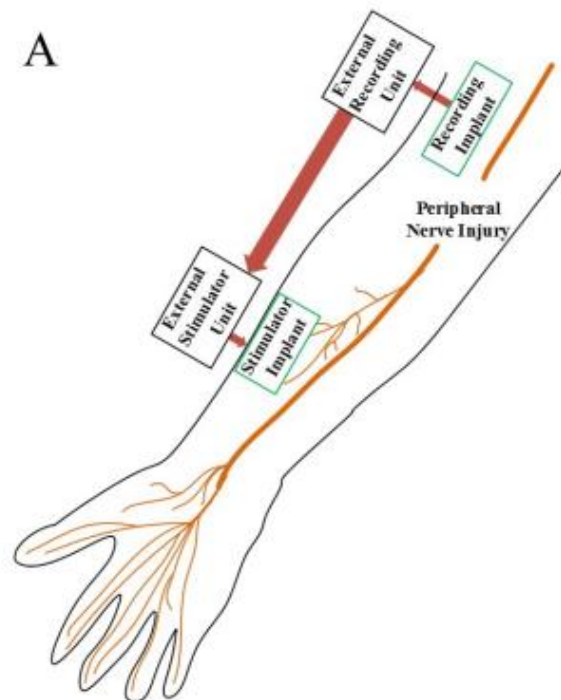


Figura 16 - Descrição da implementação do implante. [2]

2.6. Diferentes topologias de Acoplamento indutivo ressonante

Existem diferentes tipos de abordagens na construção de um protótipo

Na Figura 17 estão representados os diferentes tipos de mecanismos utilizados para transferência de energia de campo próximo indutiva:

- Circuito de acoplamento indutivo não ressonante (a);
- Circuito de acoplamento indutivo ressonante (2 bobinas) (b);
- Circuito de acoplamento indutivo ressonante (4 bobinas) (c);

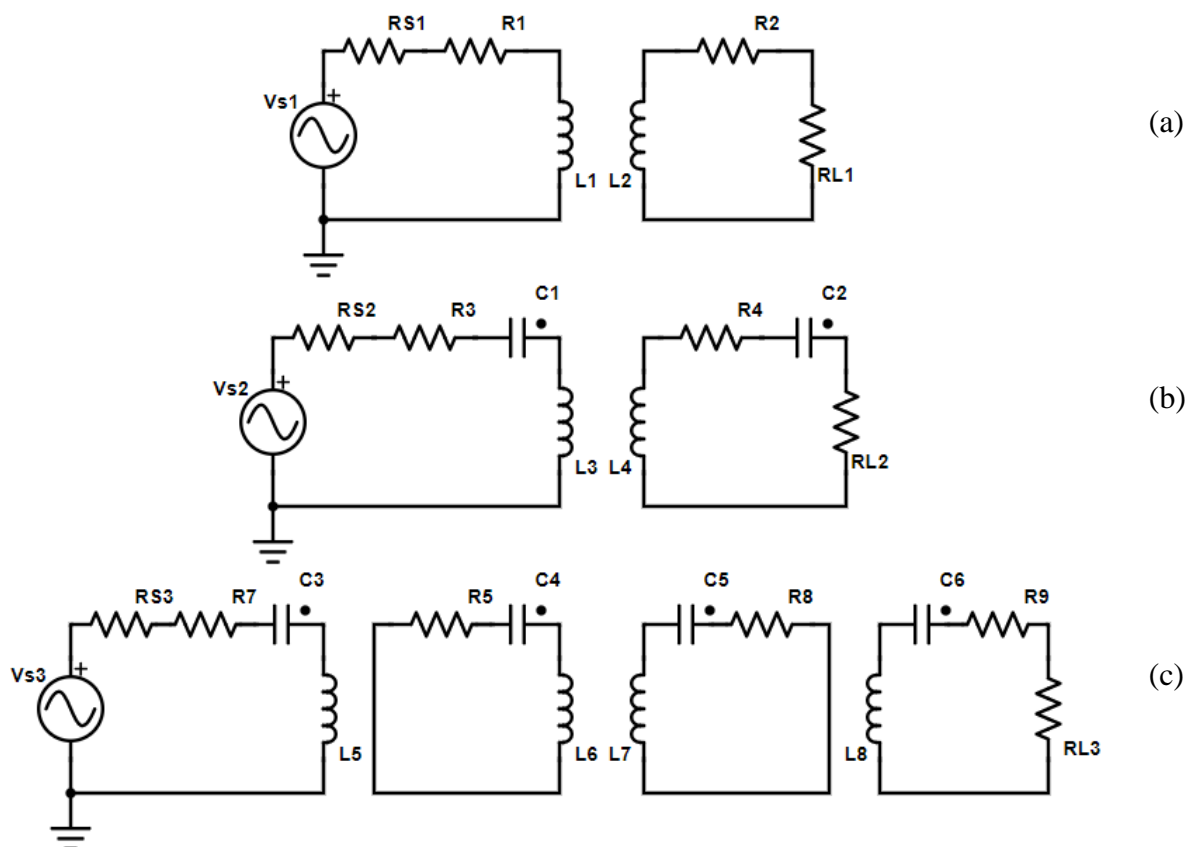


Figura 17 – Diferentes topologias de acoplamento indutivo ressonante.

2.6.1. Acoplamento indutivo não ressonante.

A topologia do circuito de acoplamento indutivo não ressonante baseia-se no circuito utilizado nos transformadores. Apesar da semelhança não é utilizado um núcleo de alta permeabilidade, originando neste caso uma maior dissipação da energia transferida visto que este baseia-se no princípio da indução. Esta dispersão da energia transferida originada pela ausência de um núcleo ferromagnético, dificulta a possibilidade de atingir grandes distância através deste método.

2.6.2. Acoplamento indutivo ressonante (2 bobinas).

Através do acoplamento indutivo ressonante é possível ultrapassar as limitações anteriormente mencionadas. A adição de condensadores permite ao circuito entrar em

ressonância [Anexo 1]. Dentro deste método existem várias topologias possíveis, das quais, na Figura 18, todas utilizam um par de bobinas que possuem indutância mútua representado por M que têm em consideração as propriedades das bobinas e a sua distância [Anexo 1]. As resistências $R1$ e $R2$ representam as perdas presentes no circuito do primário e secundário tais como resistência interna da fonte, resistência interna das bobinas e condensadores e resistência dos fios. Os condensadores $C1$ e $C2$ utilizados no circuito ajudam na criação de ressonância para o circuito [Anexo 1]. A fonte de tensão U_s , representa a entrada do circuito.

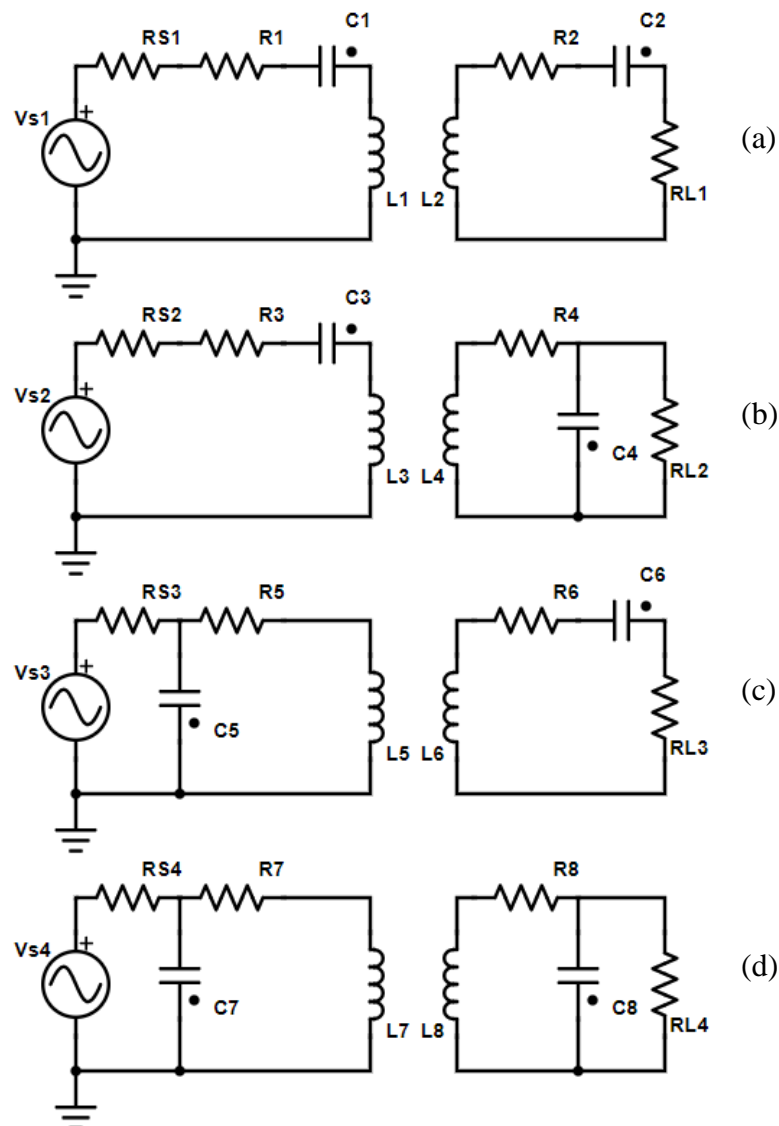


Figura 18 – Topologia existentes em acoplamento indutivo ressonante (2 bobinas).

É possível então fazer a respectiva distinção entre os circuitos:

- Série, série (SS);
- Série, paralelo (SP);
- Paralelo, série (PS);
- Paralelo, paralelo (PP);

Cada uma das 4 topologias representadas apresentam vantagens e desvantagens no uso de um sistema de transferência de energia. Fazendo uma análise de circuito à primeira topologia (a) os parâmetros de impedância equivalente e frequência podem ser expressas como:

$$\begin{cases} \overline{U}_S = \overline{U}_{C1} + \overline{U}_{R1} + \overline{U}_{L1} \\ 0 = \overline{U}_{C2} + \overline{U}_{R2} + \overline{U}_{L2} \end{cases} (=) \begin{cases} \overline{U}_S = \overline{I}_1 \left(R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) - j\omega \overline{I}_2 M \\ 0 = \overline{I}_2 \left(R_2 + R_L + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right) - j\omega \overline{I}_1 M \end{cases} \quad (2.1)$$

Sendo,

- U_{C1} a queda de tensão no condensador do primeiro circuito;
- U_{R1} a queda de tensão na resistência do primeiro circuito;
- U_{L1} a queda de tensão no indutor do primeiro circuito;
- U_{C2} a queda de tensão no condensador do segundo circuito;
- U_{R2} a queda de tensão na resistência do segundo circuito;
- U_{L2} a queda de tensão no indutor do segundo circuito;
- ω – Representa a frequência angular ($2\pi f$);
- M - o coeficiente de indução mútua;

Se:

$$\begin{cases} \overline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \\ \overline{Z}_2 = R_2 + R_L + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \end{cases} \quad (2.2)$$

Então:

$$\begin{cases} \overline{U}_S = \overline{I}_1 \overline{Z}_1 - j\omega I_2 M \\ 0 = \overline{I}_2 \overline{Z}_2 - j\omega I_1 M \end{cases} (=) \begin{cases} \overline{U}_S = \overline{I}_1 \overline{Z}_1 - j\omega \left(\frac{j\omega I_1 M}{\overline{Z}_2} \right) M \\ \overline{I}_2 = \frac{j\omega I_1 M}{\overline{Z}_2} \end{cases} \quad (2.3)$$

De modo a obter a impedância de entrada:

$$Z_{eq1} = \frac{\overline{U}_S}{I_1} = \frac{\overline{I}_1 \overline{Z}_1 - j\omega \left(\frac{j\omega I_1 M}{\overline{Z}_2} \right) M}{I_1} = Z_1 + \frac{\omega^2 M^2}{Z_2} = Z_1 + Z_{r1} \quad (2.4)$$

A parcela Z_{r1} representa a impedância refletida de L1 resultante do circuito Rx e dos componentes ligados a esta:

$$Z_{r1} = \frac{(\omega_s M)^2}{R_2 + R_L} \quad (2.5)$$

E frequência de ressonância:

$$\omega_s^2 = \frac{1}{L_2 C_{s2}} \quad (2.6)$$

Para SP os mesmos parâmetros do secundário podem ser expressos como:

$$Z_{r2} = \frac{(\omega_p M)^2}{R_2 + \frac{L_2}{C_{p2} R_L}} \quad (2.7)$$

E frequência de ressonância:

$$\omega_s^2 = \frac{1}{L_2 C_{p2}} - \frac{1}{L_2^2 C_{p2}^2} \quad (2.8)$$

Considerando que a frequência de ressonância de ambos o primário e secundário são

iguais, de acordo com a regra do divisor de tensão, a eficiência do circuito é mais alta quando a impedância equivalente do secundário do circuito é maior que no primário, ou seja, $Z_r \gg Z_{eq1}$. Fazendo a comparação entre as equações apresentadas nos casos SS e SP, é possível concluir que a escolha da topologia PS é feita quando a condição $R_L > (L_2/C_{p2})^{0,5}$ é satisfeita.

2.6.3. Acoplamento indutivo ressonante (4 bobinas) e Fator de Qualidade

Um dos aspectos a ter em conta num sistema de transmissão sem fios é o fator de qualidade, que pode ser calculado através da seguinte equação:

$$Q = \frac{X_L}{R_L} \quad (2.9)$$

Sendo:

- X_L Reatância indutiva da bobina;
- R_L a resistência da bobina;

Este pode ser definido pela razão entre a energia armazenada e a energia perdida a cada ciclo de operação, de um ponto de vista físico [8] .

O último circuito apresenta na Figura 18 representa um modelo de transmissão onde não existe isolamento entre R_S e a bobina transmissora ou R_L e a bobina recetora, o que contribui para a diminuição do fator de qualidade Q do circuito ressonante. Tais resistências como a de fonte e carga, são tidas em conta para a qualidade total da bobina. Fabricantes tentam elevar o máximo possível o valor do fator de qualidade de modo a minimizar o fator de perda FP.

Este descreve a relação entre a potência dissipada e a potência de saída.

$$FP = \frac{P_d}{P_t} \quad (2.10)$$

Sendo:

- P_d a potência dissipada;
- P_t a potência total;

O objetivo é minimizar o fator de perdas de uma bobina de modo que a potência de saída seja alta. Este fator de perdas diminui com o aumento do produto entre a qualidade da bobina e o coeficiente de acoplamento magnético ($Q \cdot k$). Este coeficiente depende da distância entre as bobinas [Anexo (3.17)], ou seja, quanto maior a distância entre elas, menor o valor de “k”. O principal objetivo do fabricante será maximizar o valor de X_L , e minimizar o valor de R.

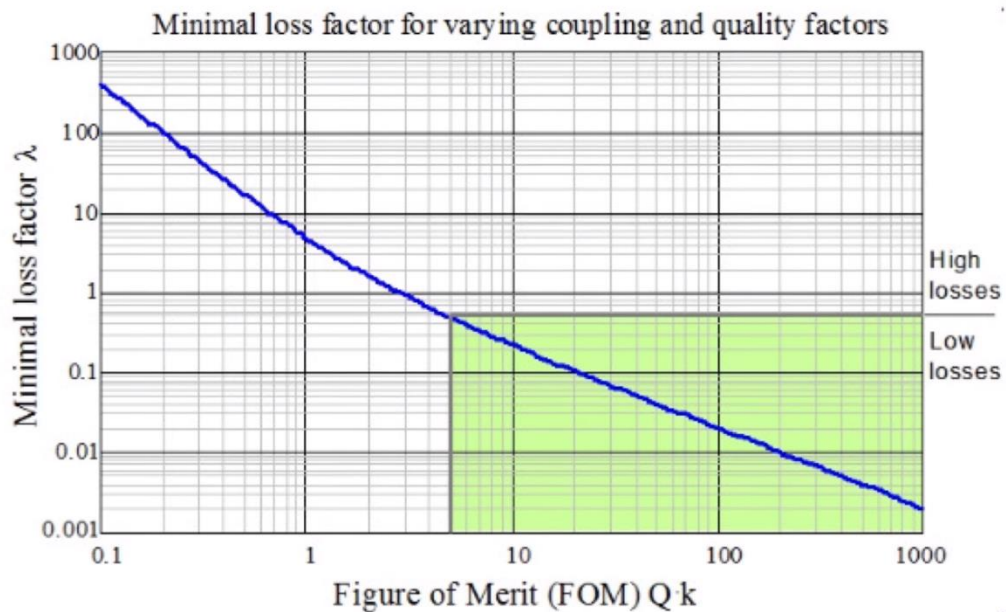


Figura 19 – Gráfico de qualidade da bobina. [I9]

Visto que a minimização da resistência da bobina é um fator importante para a sua qualidade, os fabricantes utilizam como condutor da bobina um conjunto de fios finos em vez de apenas um fio. A principal razão é o efeito pelicular no condutor. Este limita a zona de circulação de condutores elétricos em regime de CA. A corrente flui maioritariamente na zona exterior do condutor aumentando assim a sua resistência total. Esta zona, ilustrada na Figura 20, em que a corrente elétrica flui é designada por profundidade de penetração δ e é dada pela seguinte equação:

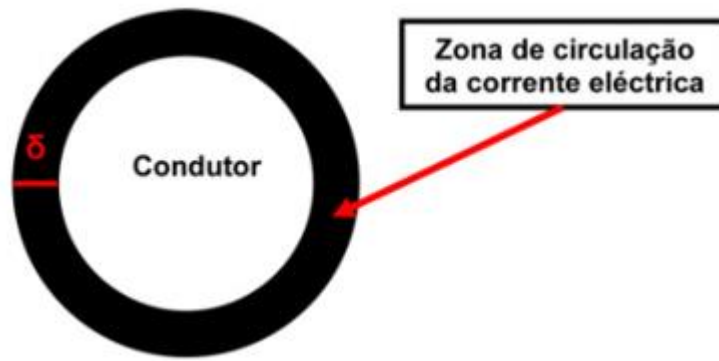


Figura 20 – Profundidade de penetração. [I6]

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \times \sqrt{\sqrt{1 + (\rho\omega\epsilon)^2} + \rho\omega\epsilon} \quad (2.11)$$

Sendo que:

- ρ – Representa a resistividade do condutor;
- ω – Representa a frequência angular ($2\pi f$);
- μ - Representa a permeabilidade do condutor ($\mu = \mu_r \mu_0$);
- μ_r – Representa a permeabilidade relativa do condutor;
- μ_0 – Representa a permeabilidade livre do condutor;
- ϵ – Representa a permissividade do condutor ($\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$);
- ϵ_r – Representa a permissividade relativa do condutor;
- ϵ_0 – Representa a permissividade livre do condutor;

A solução representada no último circuito (c) presente na Figura 17 tem como objetivo solucionar esta adversidade isolando as respectivas resistências R_s (Resistência interna da fonte de alimentação U_s) e R_c (resistência da carga). Ambas coadjuvam tanto o aumento de perdas nos circuitos por efeito joule, como para a redução do fator de qualidade Q e, conseqüentemente, a minimização do rendimento do sistema de transmissão.

A separação entre as resistências (R_s e R_c) e os circuitos ressonantes (L_{tx} e L_{rx}) é apresentada como uma solução para esta diminuição do fator de qualidade. As bobinas representadas no circuito (L_1, L_2, L_3 e L_4), partilham entre si um campo magnético definido pelos respectivos coeficientes de acoplamento magnético (k_{12}, k_{23} e k_{34}).

Capítulo 3

Conceção do protótipo

3.1. Introdução

A conceção do protótipo e dos seus processos inerentes, é considerado um aspeto importante no desenvolvimento de um estudo, teoria ou objeto.

Este tipo de metodologia permite ao investigador fazer uma análise detalhada do objeto em estudo aplicando os métodos necessários de planeamento, condução e conclusão do mesmo, proporcionando assim no final, validação da questão inicial.

Este capítulo demonstra tanto os métodos e ferramentas utilizadas na conceção do protótipo, como o estudo dos conceitos fundamentais ao processo do mesmo.

Serão também expostos os pormenores essenciais associados à simulação, e implementação do protótipo de um sistema de transferência de energia sem fios. É apresentado o sistema proposto através do programa de simulação MATLAB. Ainda, neste capítulo é descrito de forma detalhada a montagem do mesmo.

3.2. Estudo teórico do protótipo

O princípio de funcionamento do protótipo é baseado no método de transferência de campo próximo, através do acoplamento indutivo ressonante. Na Figura 21 é representado o esquema completo do circuito de WPT, esta encontra-se seccionada por grupos de blocos construtivos que representam uma zona específica de funcionamento do circuito.

A zona denominada A, logo a seguir à entrada do circuito representa o inversor contruído a partir de MOSFETs que irão gerar uma onda quadrada. As zonas que se seguem fazem parte do circuito ressonante e são o Tx e o Rx. São ambos constituídos por um condensador e uma bobine que, na frequência de ressonância, irá gerar a mínima impedância na zona B, e máxima impedância na zona C. De seguida na zona D – que representa a zona do circuito onde ocorre a retificação – A onda é recebida pelo recetor. Este retificador é constituído por uma ponte de díodos, configurada de modo que estes funcionem aos pares. Por último na zona E, está representado um filtro e conversor elevador de tensão com controlo em cadeia fechada.

O principal objetivo do filtro é estabilizar a onda à saída do retificador obtendo assim uma

tensão contínua. O conversor irá elevar e estabilizar o valor da tensão de saída com ajuda do sistema de controlo em cadeia fechada. Este valor poderá ser regulado de modo a satisfazer a tensão pedida pela carga.

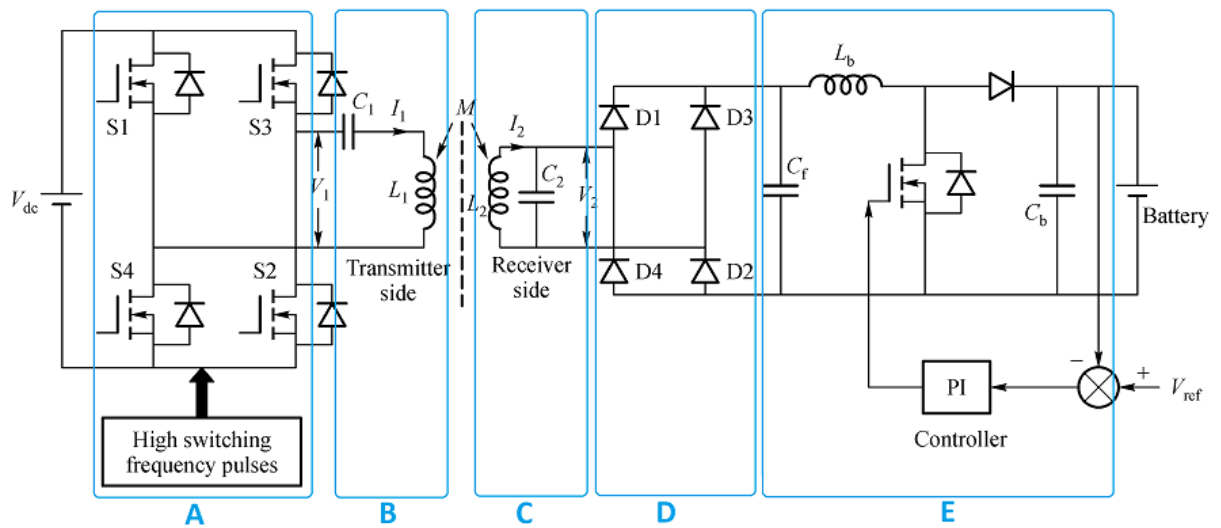


Figura 21 – Esquema completo do circuito de WPT.

3.2.1. Circuito ressonante

Na Figura 22 é possível observar o modelo do circuito ressonante. Este é constituído por duas malhas RLC, a Tx e Rx, respetivamente.

De modo a maximizar a transferência de potência entre os dois circuitos a frequência de V_f deve ser igual à frequência de ressonância do par LC. Isso permite minimizar a impedância e maximizar a corrente no circuito e de acordo com a equação do coeficiente de autoindução no Anexo [A1], o fluxo aumenta.

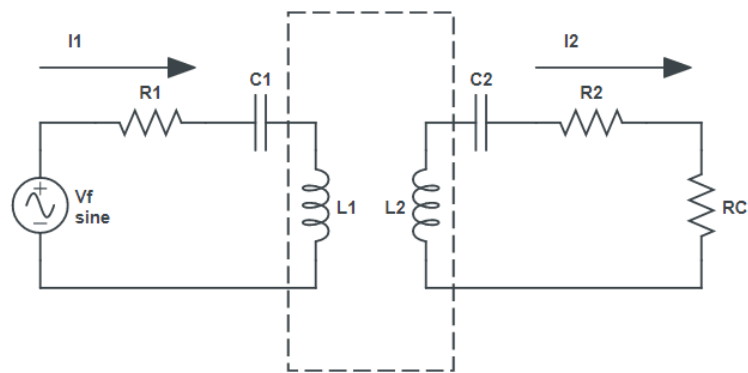


Figura 22 – Esquema o circuito ressonante.

A frequência de ressonância do par indutor-condensador torna-se uma propriedade importante pois, à frequência de ressonância, a impedância do circuito série torna-se muito baixa maximizando a corrente, e assim, o fluxo magnético gerado pela bobina. Esta frequência pode ser calculada através da seguinte expressão:

Frequência de ressonância:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (3.1)$$

Efetuada uma análise ao circuito pode ser retirado o valor da expressão tanto da potência como o rendimento:

Kirchhoff lado da fonte:

$$\bar{V}f = \bar{I}_1 R_1 + \bar{I}_1 X C_1 + I_1 X L_1 - \cancel{I_1 X M} + \cancel{I_1 X M} - I_2 X M \quad (3.2)$$

$$\bar{V}f = \left(R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) \bar{I}_1 - j\omega M I_2 \quad (3.3)$$

Kirchhoff lado da carga:

$$0 = \bar{I}_2 R_2 + \bar{I}_2 X C_2 + \bar{I}_2 X L_2 - \cancel{I_2 X M} + \cancel{I_2 X M} - I_1 X M \quad (3.4)$$

$$0 = \left(R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right) I_2 - j\omega M I_1 \quad (3.5)$$

Correntes:

$$\begin{cases} \bar{V}_f = \bar{Z}_1 \bar{I}_1 - j\omega M \bar{I}_2 \\ 0 = \bar{Z}_2 \bar{I}_2 - j\omega M \bar{I}_1 \end{cases} (=) \quad (3.6)$$

$$\begin{cases} \bar{I}_1 = (\bar{V}_s - j\omega M \bar{I}_2) / Z_1 \\ \bar{I}_2 = j\omega M \bar{I}_1 / Z_2 \end{cases} (=) \quad (3.7)$$

$$\begin{cases} \bar{Z}_1 \bar{Z}_2 \bar{I}_1 = \bar{Z}_2 \bar{V}_s - \omega^2 M^2 \bar{I}_1 \\ \bar{Z}_1 \bar{Z}_2 \bar{I}_2 = j\omega \bar{V}_s - \omega^2 M^2 \bar{I}_2 \end{cases} (=) \quad (3.8)$$

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{Z}_2 \bar{V}_s}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \omega^2 M^2} \quad (3.9)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{j\omega \bar{V}_s}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \omega^2 M^2} \quad (3.10)$$

Potência:

$$P_e = V_s I_1 \cos \varphi \quad (3.11)$$

$$(3.12)$$

$$P_s = R_c I_2^2$$

$$\eta = \frac{P_S}{P_e} = \frac{R_c I_2^2}{V_s I_1 \cos \varphi} \quad (3.13)$$

3.2.2. Inversor

Inversores são equipamentos de permitem a conversão de corrente contínua em alternada, ou seja, um exemplo de função é converter 50V CC em 230V CA 50Hz para uso doméstico.

Existem 3 tipos principais de inversores comercializados, o de onda quadrada, o de sinusoidal puro e o sinusoidal modificado. A diferença entre os vários tipos de inversor está na forma de onda da sua respetiva saída. Deste modo, torna-se essencial escolher o tipo de inversor mais adequado para a sua respetiva função e onde irá operar. Na Figura 23 está representada a forma de onda na saída do inverso.

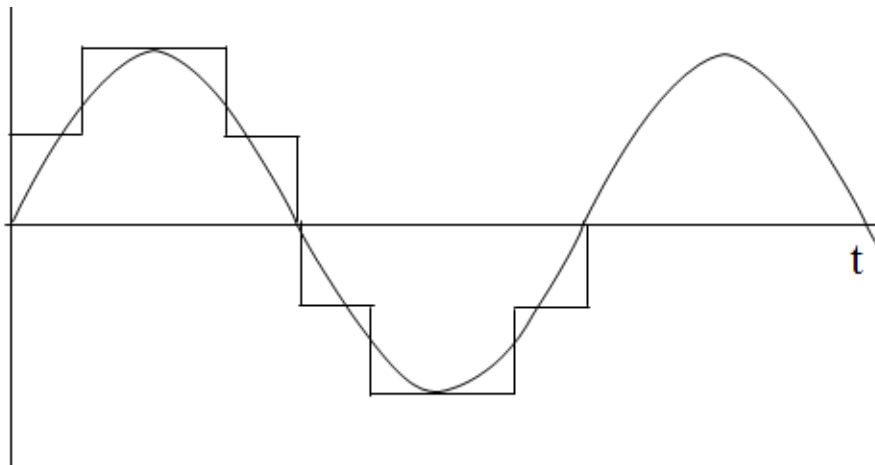


Figura 23 – Forma de onda na saída do inversor.

A topologia construtiva do inversor faz uso de uma ponte H, um circuito de comando, e pode ser representado pela seguinte Figura 24:

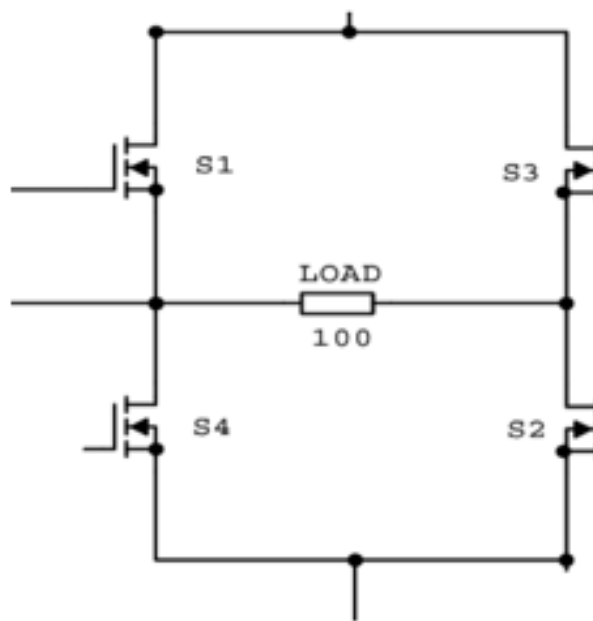


Figura 24 - Esquema generalizado de uma ponte H. [I10]

Nesta topologia são utilizados 4 MOSFETs que atuam em pares, quando S1 e S2 se encontram ativos, S3 e S4 encontram-se desligados. A carga recebe então corrente num sentido. Após um período morto onde todos os MOSFETs se encontram desligados, S3 e S4 são ativos e S1 e S2 permanecem desligados, seguido de outro período morto. Nesta fase a carga recebe então uma corrente no sentido contrário ao inicial.

Este comportamento dos transístores é controlado por um microcontrolador e a uma frequência predefinida que corresponde à frequência de ressonância do par: bobina condensador. O comportamento anteriormente descrito diz respeito ao inversor de onda sinusoidal modificada.

3.2.3. Ponte de díodos

O díodo é constituído por material semicondutor. Este, quando percorrido por uma corrente elétrica, faz com que esta tenha apenas um sentido. A polarização inversa do díodo permite o bloqueio da corrente, porém se a tensão for maior que a indicada pelo fabricante este efeito será anulado.

As pontes de díodos são formadas por 4 díodos como está indicado na Figura 25, e são bastante utilizadas na conversão de corrente alternada para contínua, sendo este componente muito comum em fontes de alimentação. Diferente do retificado de meia onda onde é apenas utilizado um díodo, com a configuração em ponte de 4 díodos é possível retificar ambos os semiciclos

da onda, permitindo assim, uma maior eficiência na retificação.

De modo a filtrar o sinal à saída do retificador, é colocado um condensador com objetivo impedir alterações bruscas no nível de tensão.

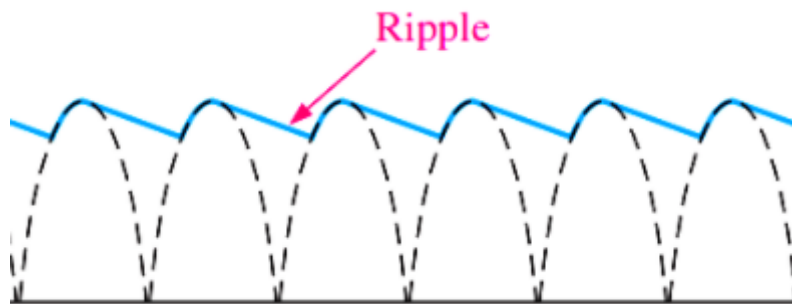


Figura 25 - Onda resultante após filtragem com condensador. [111]

Sendo a tensão de saída da bobina Rx uma tensão sinusoidal, a colocação de uma ponte de díodos irá permitir a retificação da mesma.

3.2.4. Conversor CC-CC elevador

O conversor CC-CC elevador é caracterizado pela tensão de saída ser maior que a tensão de entrada. A Figura 26 representa o circuito eletrónico de um conversor CC-CC

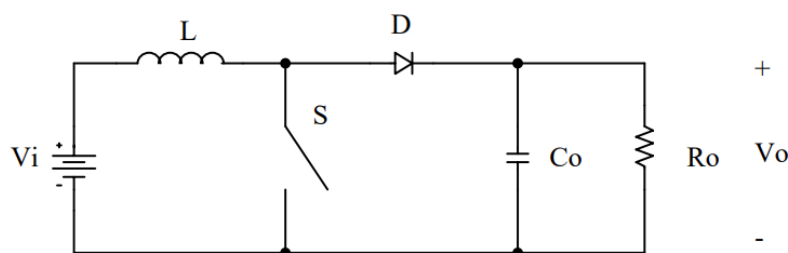


Figura 26 - Esquema do circuito CC Boost.

O circuito possui dois estados de funcionamento delimitados pelo interruptor S.

1º Estado – O interruptor S encontra-se fechado, a corrente na malha L + S aumenta à medida que o indutor L é magnetizado

2º Estado – O interruptor é aberto e as tensões $V_i + V_L$ somam-se e carregam o condensador C_o com uma tensão superior à tensão de entrada. Este interruptor volta a abrir e fechar com uma certa frequência e ciclo ativo.

Este intervalo de comutação é dado por:

$$T_s = \frac{1}{F_s} \quad e(3.14)$$

Sendo:

- F_s a frequência de comutação;
- T_s o período de comutação;

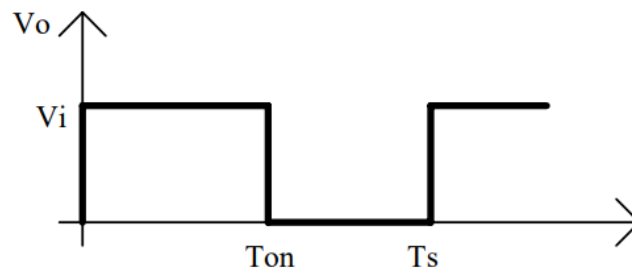


Figura 27 - Exemplo de onda quadrada utilizada no interruptor do CC Boost.

A razão entre T_{on} e T_s é definido como ciclo de trabalho e dado por $Dt = T_{on}/T_s$.

3.3. Simulação

A simulação tem como objetivo principal estudar detalhadamente o comportamento do circuito.

A montagem da Figura 28 baseia-se no circuito apresentado durante o estudo teórico no capítulo 3 e possui os seguintes componentes:

- Tensão de entrada;
- Comando;
- Inversor;
- Circuito ressonante;
- Ponte de díodos e filtro;

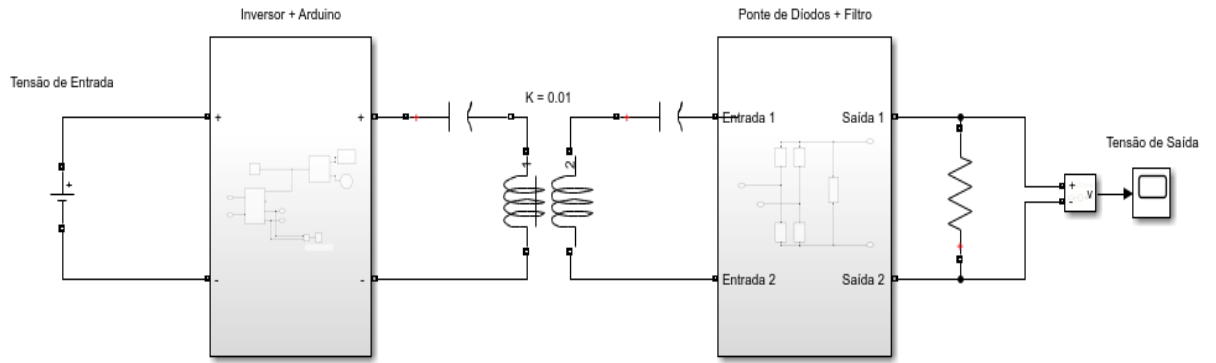


Figura 28 - Circuito WPT Matlab

3.3.1. Inversor e Arduíno

O seguinte bloco de simulação de MATLAB representa o circuito de potência e o seu comando, neste caso, o inversor e o circuito oscilante. Para o inversor foi utilizado o bloco “Full Bridge MMC” presente na biblioteca Simscape do Simulink onde é aplicada uma tensão de cinco volts na sua entrada (C1 e C2), e na Uref é aplicado o sinal oscilante de modo a alternar o funcionamento da saída.

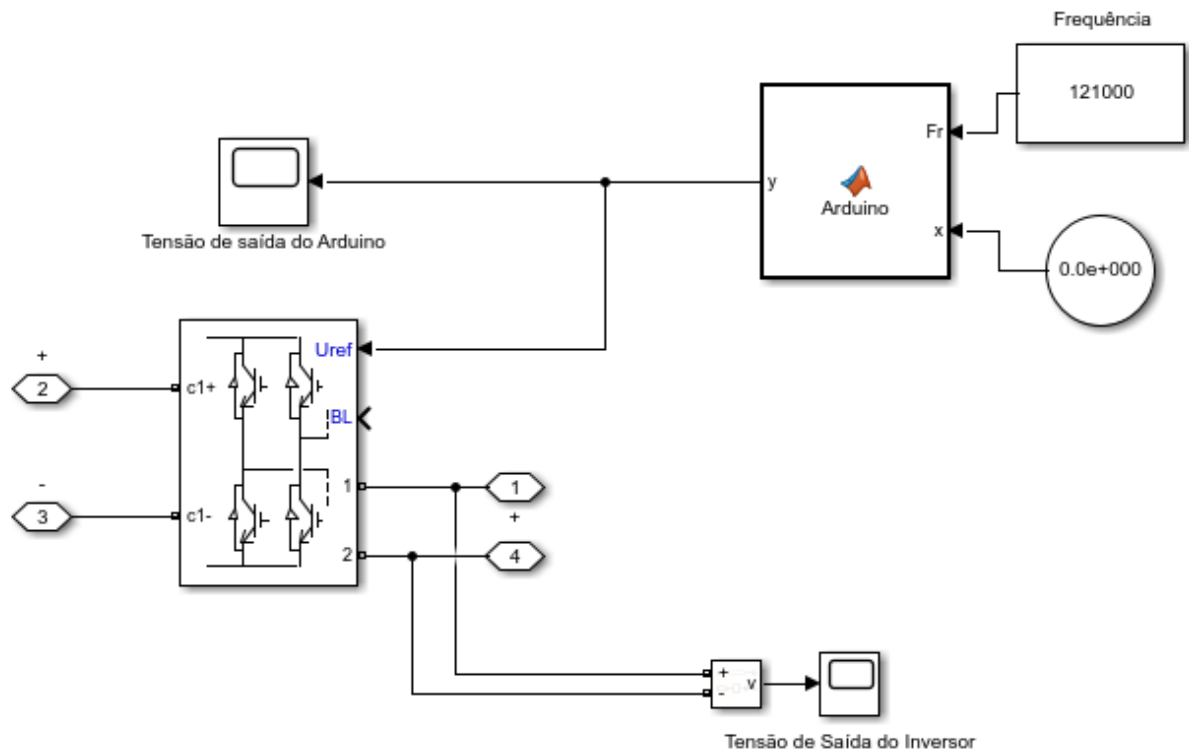


Figura 29 - Esquema inversor + circuito oscilante

No circuito oscilante foi utilizado um bloco “MATLAB Function” para programar o funcionamento do circuito oscilante usando a linguagem de programação MATLAB.

Foi utilizado um bloco “clock” que devolve um tempo em segundos e permite assim criar uma função sinusoidal. Foi também criado um bloco com uma constante para definir a frequência de oscilação. De seguida foi utilizada uma comparação dos valores da onda sinusoidal criada para gerar outro sinal com a mesma frequência, mas do tipo onda quadrada. Foi dada uma tensão base que a onda sinusoidal teria de atingir para que o sinal de onda quadrada ficasse saturado. Isto para criar um tempo morto no sinal, dado que assim irá existir um tempo em que os transístores estarão em repouso antes do circuito inverter o sentido de condução na saída. Isto representa uma medida de segurança para o circuito de potência. Na Figura 30 é apresentada a tensão à saída do inversor.

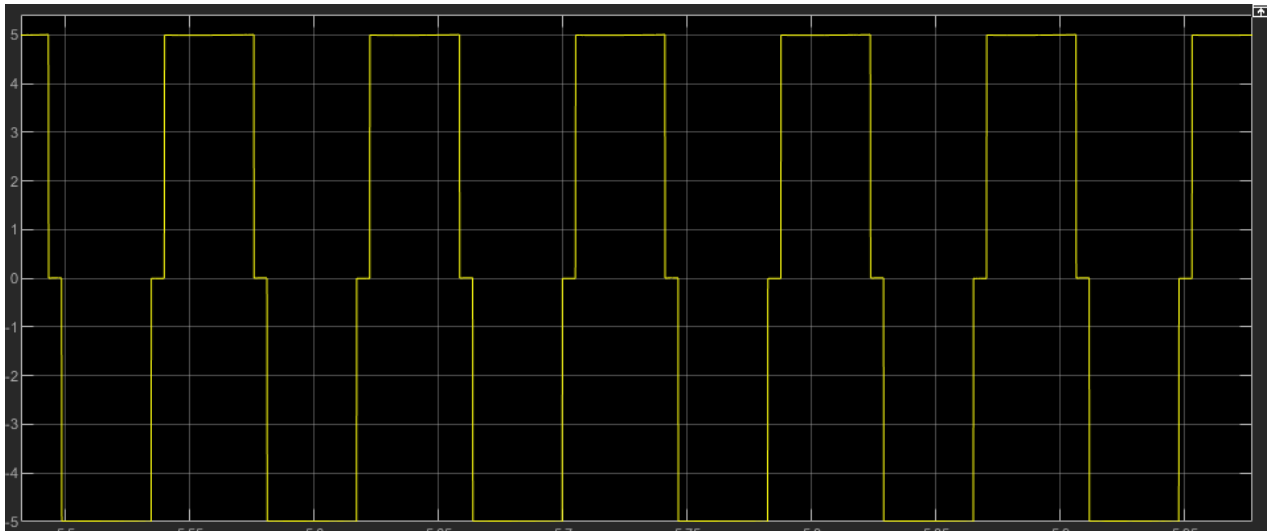


Figura 30 – Tensão de saída no inversor e tempos mortos.

3.3.2. Retificador

O bloco de retificação retratado na Figura 31 situa-se a montante do circuito ressonante Rx. É constituído por uma ponte de diodo de modo a retificar a onda sinusoidal e um condensador no fim para filtrar a saída resultante.

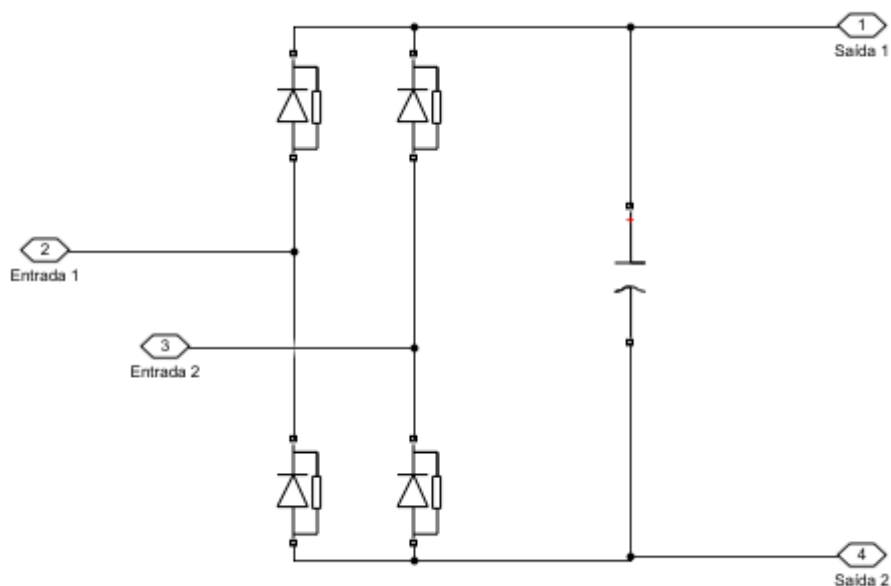


Figura 31 - Bloco retificador + filtro.

A saída da simulação, após um período transitório, irá estabilizar para uma tensão de saída de aproximadamente 5V, como ilustrado na Figura 32.

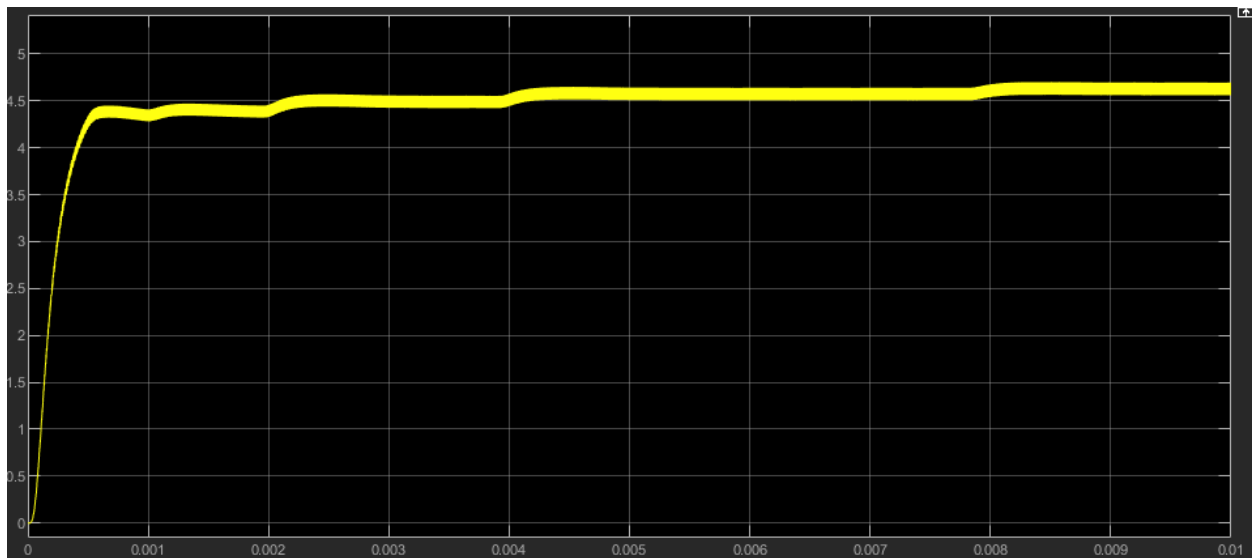


Figura 32 - Tensão de saída na carga.

3.4. Montagem

Através do programa EasyEDA foi dimensionado o circuito eletrônico da Figura 33 com base na simulação em preparação para a realização da montagem.

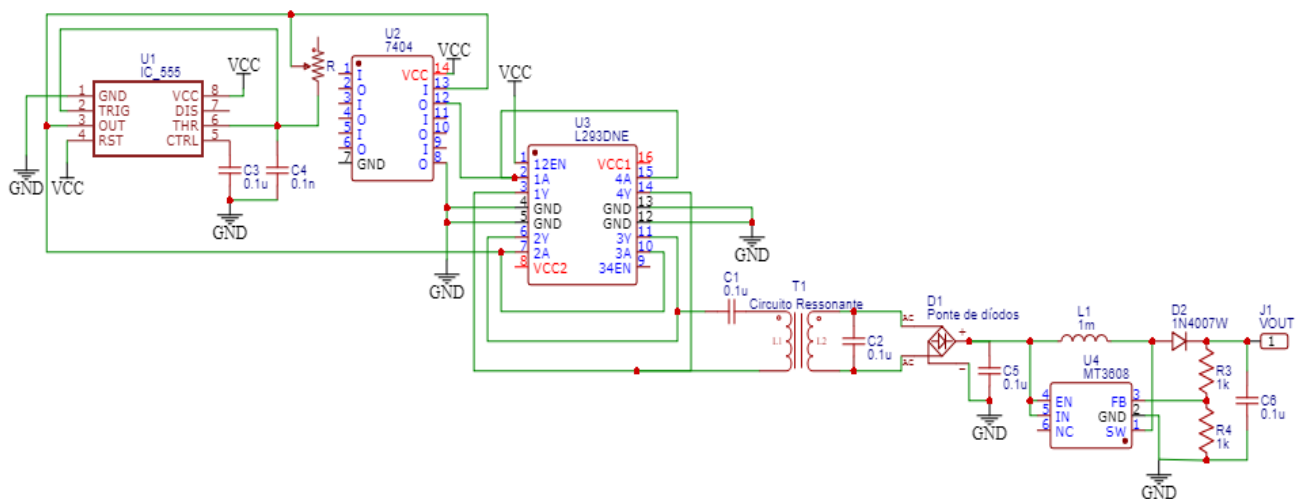


Figura 33 – Esquema do circuito realizado em EasyEDA.

O circuito proposto é constituído por variados circuitos integrados que possuem as seguintes funções:

- U1 NE555 – Circuito oscilador configurado para produzir uma onda quadrada com uma

frequência determinada por R e C4, e um ciclo ativo de aproximadamente 50%;

- U2 HD74LS04 – Porta lógica que irá inverter o sinal gerado pelo integrado 555;
- U3 L293D – Ponte H que recebe na sua entrada o sinal do oscilador e o respectivo sinal invertido para na sua saída fazer a condução do circuito ressonante;
- Circuito ressonante – Constituído por uma malha LC que recebe o sinal do L293D a uma frequência que permita a máxima produção de fluxo;
- Ponte de díodos – A ponte de díodos irá permitir utilizar o semiciclo negativo do sinal recebido na conversão de corrente alternada para corrente contínua com a ajuda do filtro;
- U4 MT3608 – É um circuito integrado que fará a elevação da tensão de saída no retificador, para uma tensão estável de 5V com a ajuda de um sistema em cadeia fechada a partir das resistências R3 e R4;

Capítulo 4

Resultados Experimentais

4.1. Introdução

Neste capítulo será apresentado todo o procedimento experimental, desde o protótipo desenvolvido e os resultados laboratoriais obtidos do modelo proposto, especificando todos os passos intermédios durante a construção do mesmo.

4.2. Construção do protótipo

Durante a implementação do modelo proposto foram tidas em consideração três principais áreas de desenvolvimento. Sendo a primeira o desenvolvimento do circuito ressonante e cálculo da frequência de ressonância a ser aplicada ao circuito. O segundo o desenvolvimento da ponte H, juntamente com o circuito oscilatório. Por último a construção do circuito retificador e filtro.

4.2.1. Montagem do circuito ressonante

A construção do protótipo foi organizada por fases, sendo a primeira a construção do circuito ressonante. Para isto foi utilizado uma bobina fabricada, e de seguida foi calculado o seu coeficiente de autoindução através do seguinte método.

Foram adicionados um condensador de valor conhecido e um amperímetro em série. Ao circuito foi aplicado um sinal sinusoidal através de um gerador de funções. Uma vez atingida a frequência de ressonância impedância do circuito alcançou o seu valor mínimo; foi então variada a frequência do gerador de funções de modo a obter o valor máximo de corrente.

Utilizando a seguinte formula foi possível calcular o valor da bobina que era previamente desconhecido.

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C} \quad (5.1)$$

Sendo:

- f - o valor da frequência [Hz];
- C - o valor da capacidade do condensador [F];

Utilizando um conhecido de um condensador como 10 nF, chegou-se a um pico de corrente por volta dos 30 kHz, o que significa que o valor da bobina é de aproximadamente 6,526 mH para a Tx e 8,623 mH para a Rx.

Tabela 3 – Características das bobinas

	Tx	Rx
Coeficiente de Auto-Indução	6,526 mH	8,623 mH
Número de Espiras	10	10
Espessura de Espiras	1 cm	0,9 cm
Espessura do Fio	1 mm	0,9 mm
Raio interior	1,1 cm	1,2 cm
Raio exterior	2,2 cm	2,1 cm

4.2.2. Arduíno e montagem do circuito oscilador

Para o circuito oscilador foi utilizado um Arduíno com a função `tone()` de modo a gerar um sinal de onda quadrada com uma determinada frequência (Anexo 2), e com um ciclo ativo de aproximadamente 50%. É utilizada uma entrada analógica do Arduíno para fazer a leitura do potenciômetro. Deste modo, é possível definir a frequência da onda quadrada. Foi também utilizado um visor LCD de resolução 16x2 com retroiluminação azul de modo a exibir valores relevantes à utilização do circuito que está representado na Figura 34.

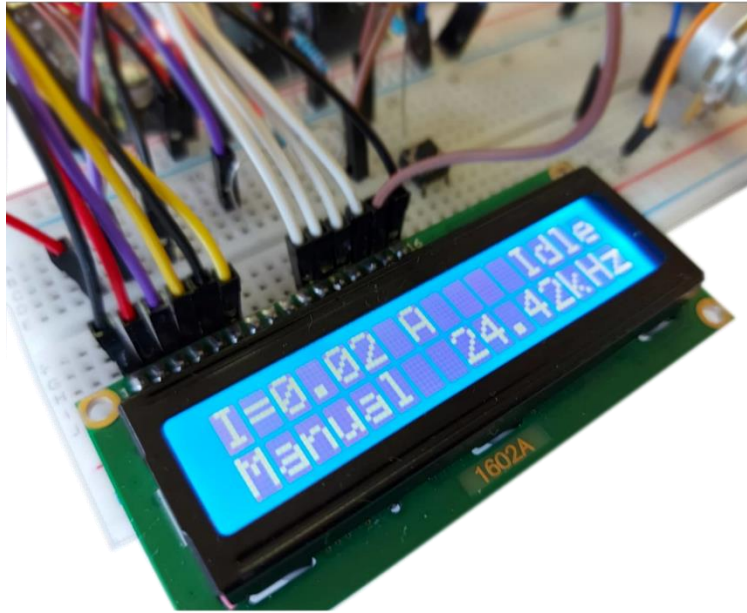


Figura 34 - LCD utilizado.

O circuito LCD tem as seguintes funções principais:

- Exibição do valor da corrente do circuito;
- Exibição do valor da frequência de ressonância da função oscilante;
- Mostrar se existe a presença de uma carga;

A Figura 35 representa a configuração utilizada.

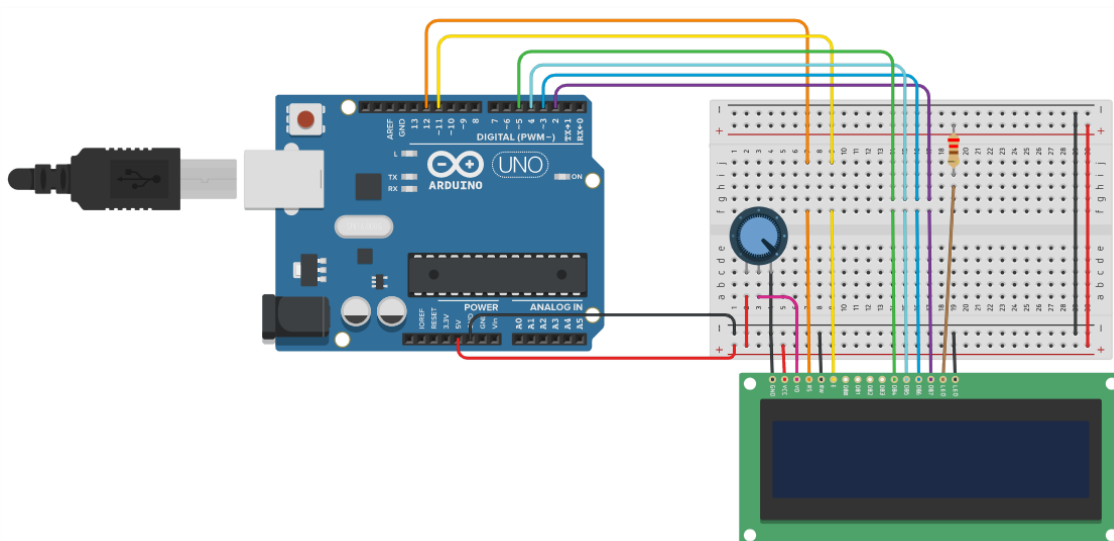


Figura 35 - Esquema de montagem do LCD e Arduíno.

Através da função de oscilação foi possível obter a onda quadrada representada na seguinte Figura 36.

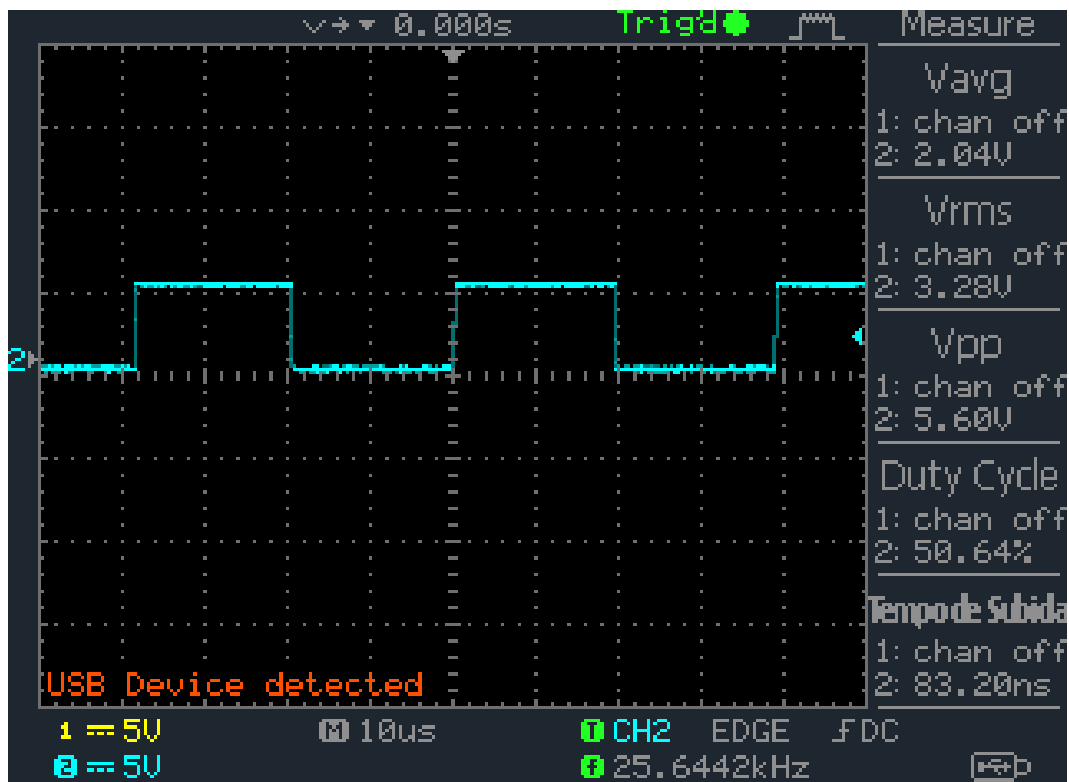


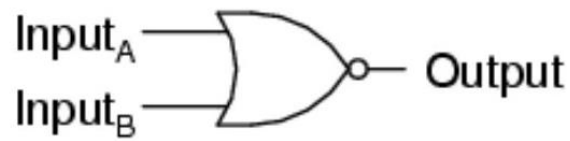
Figura 36 - Saída onda quadrada do Arduino.

A frequência de oscilação da função do Arduino é regulada de acordo com a frequência de ressonância do circuito. É de notar que esta frequência depende da indução mútua, que varia com valores com a distância e qualidade do material. Dito isto, com o aumento ou diminuição da distância de transferência irá existir uma variação na frequência de ressonância, logo, de modo a obter a máxima eficiência, será necessário variar a frequência de acordo.

4.2.3. Inversão do sinal do circuito oscilador

De modo a inverter o sinal de saída do Arduino é utilizado uma porta lógica NOR. Ligando ambas as entradas à saída do sinal do Arduino, o circuito comporta-se como uma porta NOT como está demonstrado na tabela de verdade da Figura 37.

NOR gate



A	B	Output
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Figura 37 - Esquema da porta NOR e respetiva tabela de verdade.

Foi utilizada como porta NOR o circuito integrado HEF4001, alimentado com 5V e ligado de acordo com a configuração descrita e representada na Figura 38.

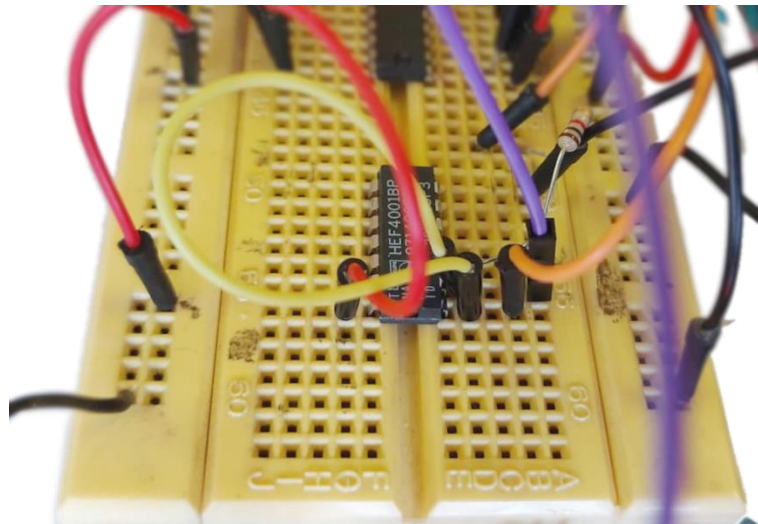


Figura 38 - Esquema de ligação da porta NOR (HEF4001).

A Figura 39 representa a configuração da porta NOR onde a entrada N está ligada à saída da onda quadrada produzida pelo Arduino. As saídas N1 e N2 representam a inversão da onda quadrada, e a própria, respetivamente.

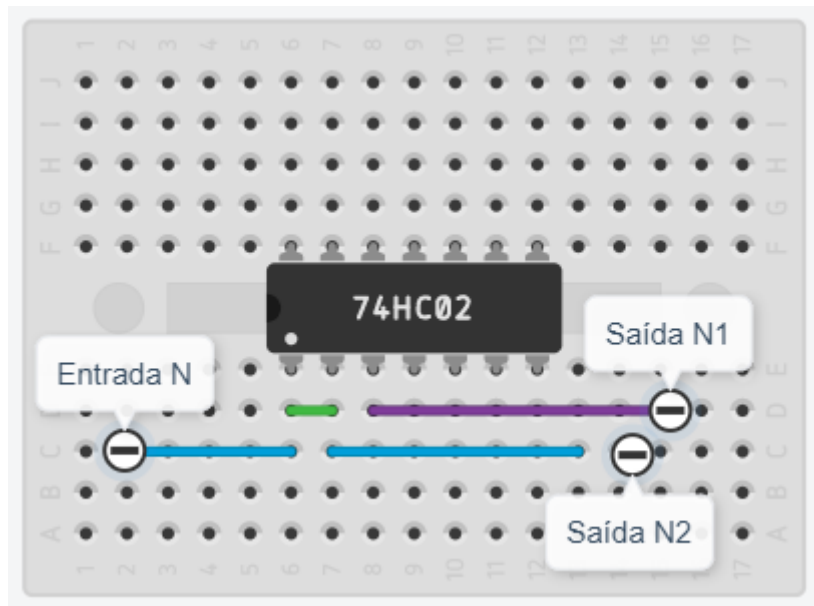


Figura 39 - Esquema de ligação da porta NOR.

As saídas (N1 e N2) encontram-se representadas na Figura 40.

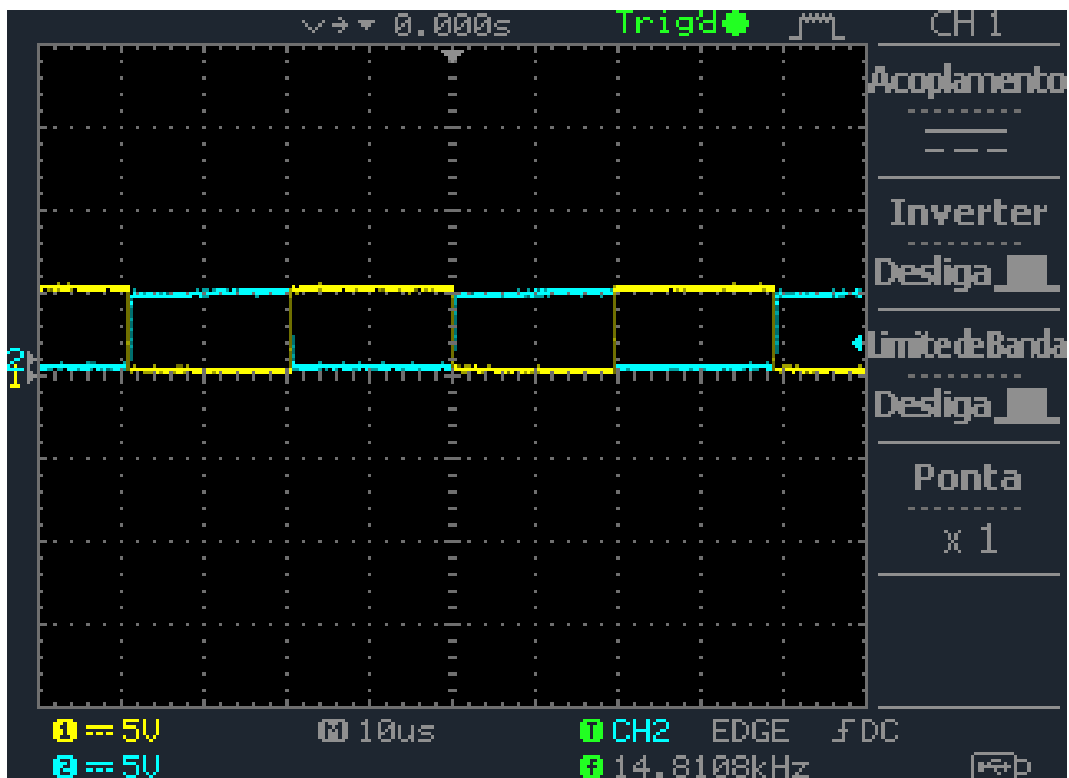


Figura 40 – Saída da porta NOR.

4.2.4. Montagem da ponte H

Foi utilizado o circuito integrado L293d que possui 2 pontes H podendo utilizar 1 ponte para o máximo de 1A e 2 pontes em paralelo para o máximo de 2^a. Isto proporcionará ao circuito ressonante uma onda quadrada com tensões de pico de 5V e -5V.

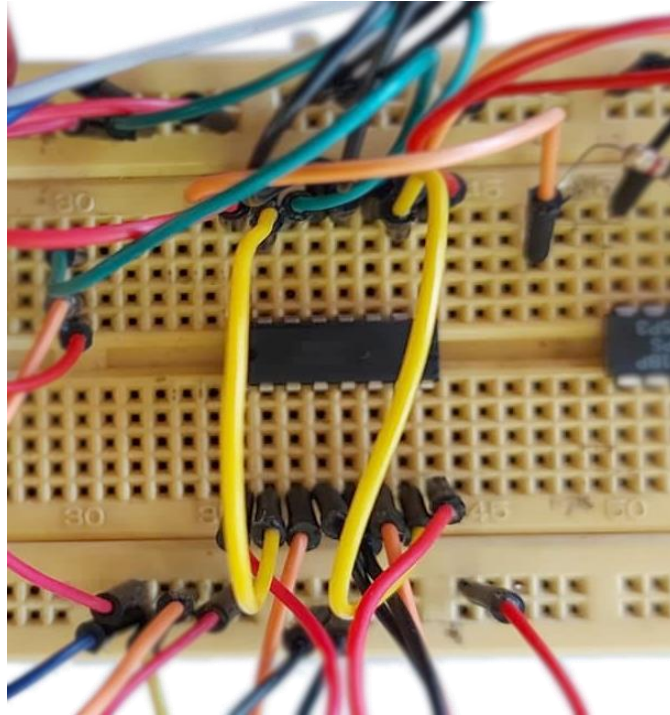


Figura 41 - Circuito de ligação do L293D.

A Figura 42 representa a configuração do circuito integrado onde a entrada P1 está ligada à saída da onda quadrada produzida pelo Arduino e a entrada P2 está ligada à saída invertida da mesma. As saídas P1 e P2 resultam da configuração das duas pontes H ligadas em paralelo e vão para a entrada do circuito ressonante. De salientar que tanto o L293d como o Arduino e o circuito integrado HEF4001 possuem uma tensão de alimentação de 5V, podendo assim serem mutuamente alimentados pela mesma fonte.

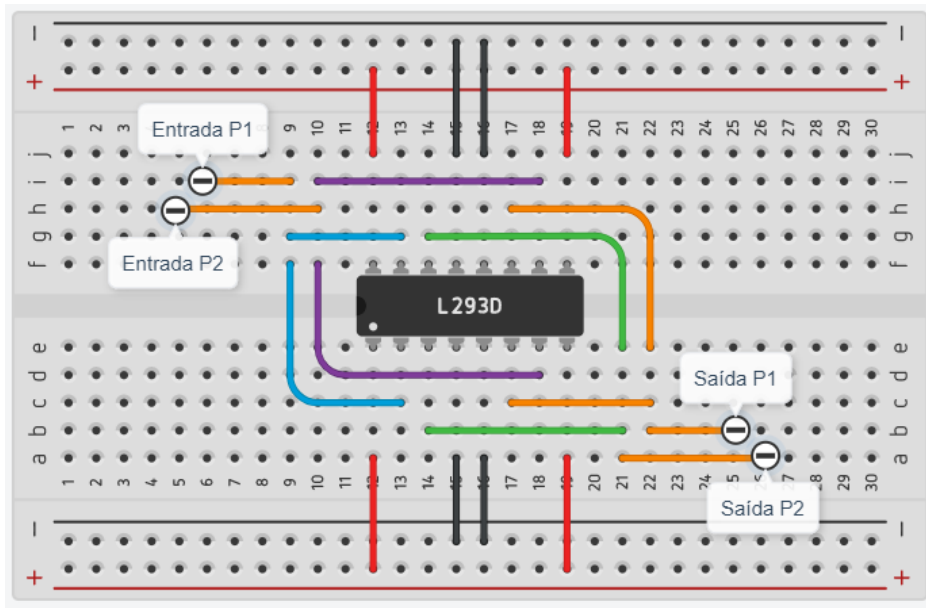


Figura 42 - Esquema de montagem do L293d.

A utilização da frequência de ressonância faz com que o circuito ressonante se comporte como um circuito aberto maximizando a sua corrente e, por consequência, a sua temperatura. Visto que o L293d possui uma temperatura máxima de junção de 150 C° , e é recomendada que durante a sua operação a sua temperatura seja 70 C° . Para evitar o sobre aquecimento do L293d é utilizado um dissipador que se encontra representado na Figura 43 de calor por cima do circuito.



Figura 43 – Dissipador de calor do L293d.

A adição de um dissipador de calor irá permitir a utilização de uma corrente de maior intensidade sem prejudicar o funcionamento do circuito integrado.

Nas seguintes Figura 44 e Figura 45 encontram-se representadas as saídas do L293D dos ensaios executados com as seguintes configurações:

- Frequência do sinal de entrada: 30kHz sem carga;
- Frequência do sinal de entrada: 30kHz com carga;

É espectável que a saída da ponte H seja uma onda quadrada de 10V de amplitude, para uma configuração sem carga na saída.

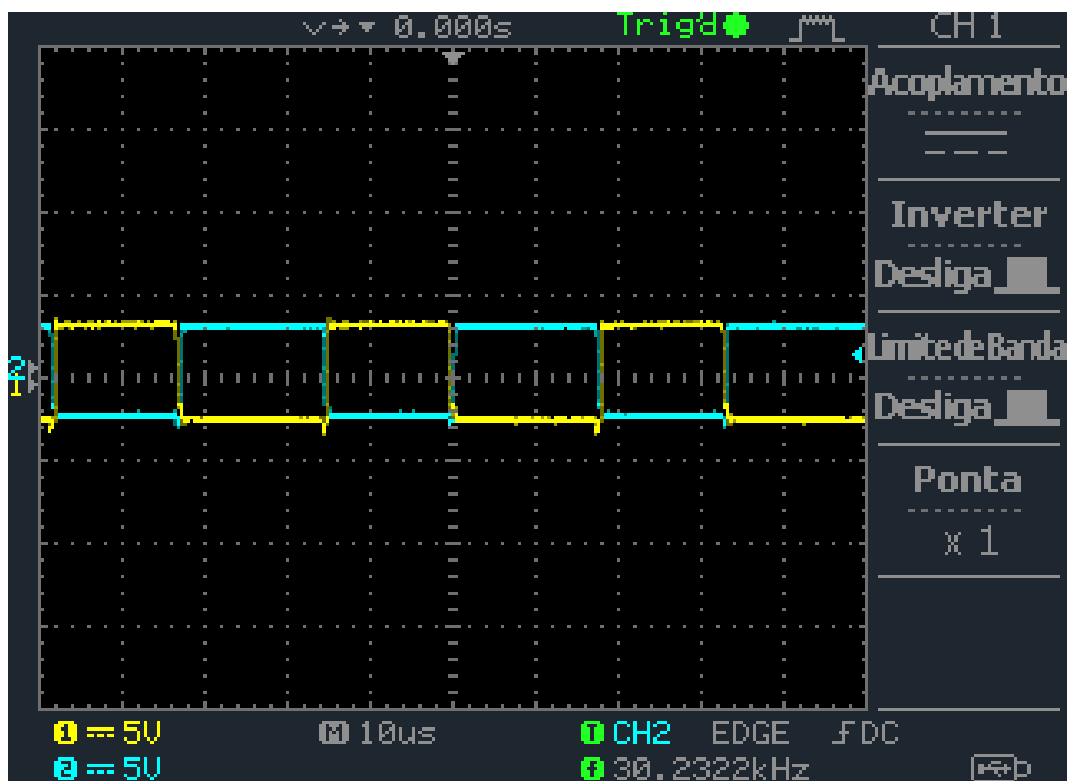


Figura 44 - Saída do L293D sem carga

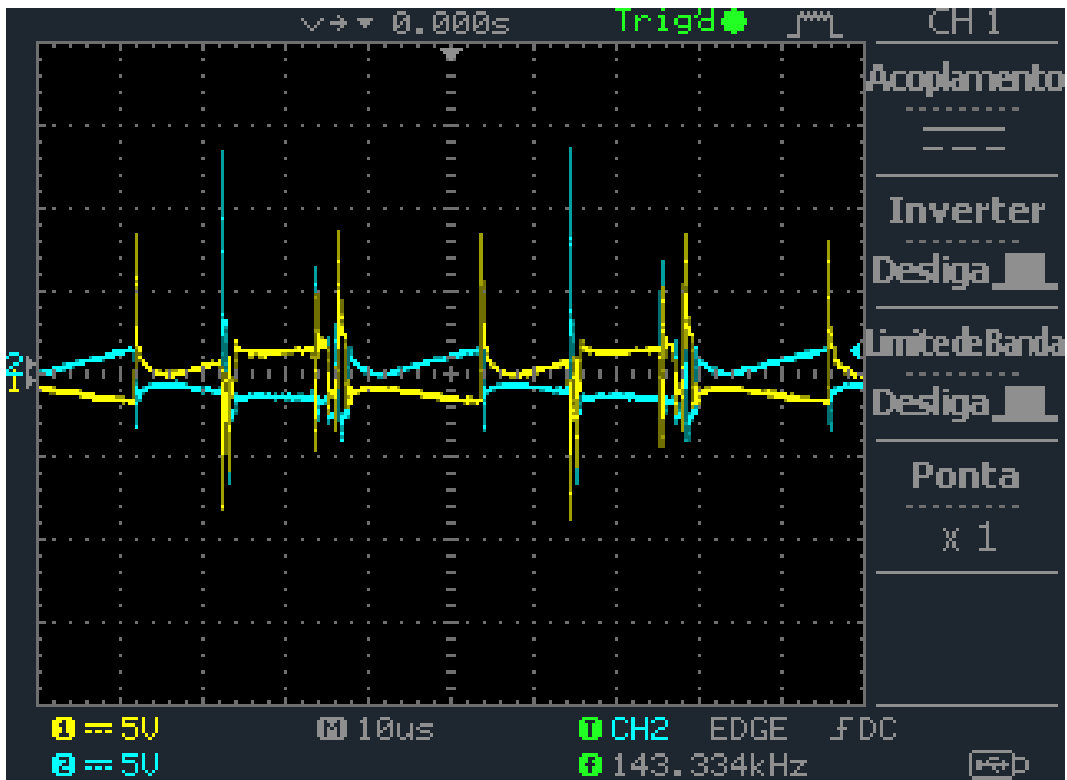


Figura 45 - Saída do L293D com carga

4.2.5. Montagem do retificador

A montagem do circuito retificador consistiu na utilização de uma ponte de díodos um filtro e um conversor elevador de corrente contínua. Optou-se por ser utilizado um conversor de tensão devido ao baixo rendimento da transferência sem fios, sendo possível então fazer a transformação para uma tensão definida pelo potenciómetro, a partir de uma tensão mais baixa, começando em 3V. A Figura 46 representa o circuito Rx montado.

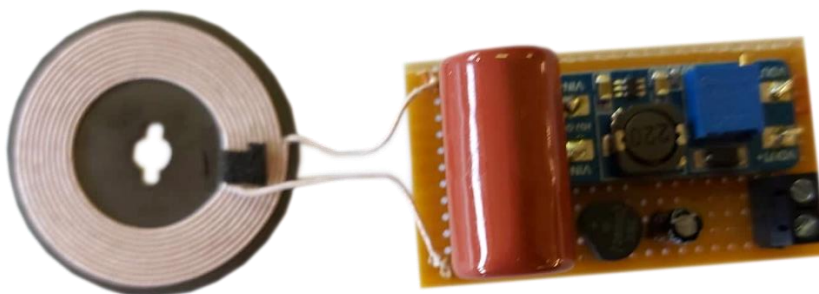


Figura 46 - Circuito Rx

Na Figura 47 encontra-se representada a tensão de saída do retificador:

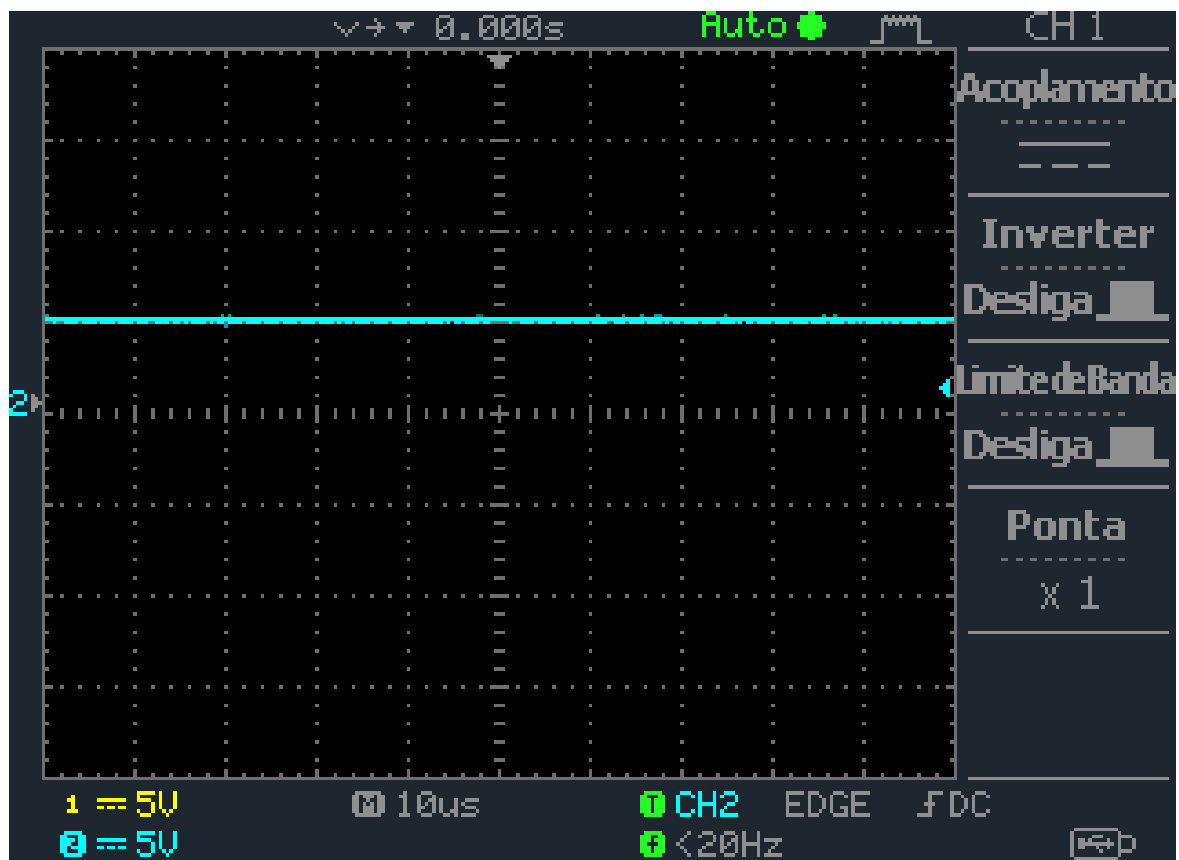


Figura 47 - Saída do retificador

Na Figura 48 encontra-se representado a montagem do protótipo.

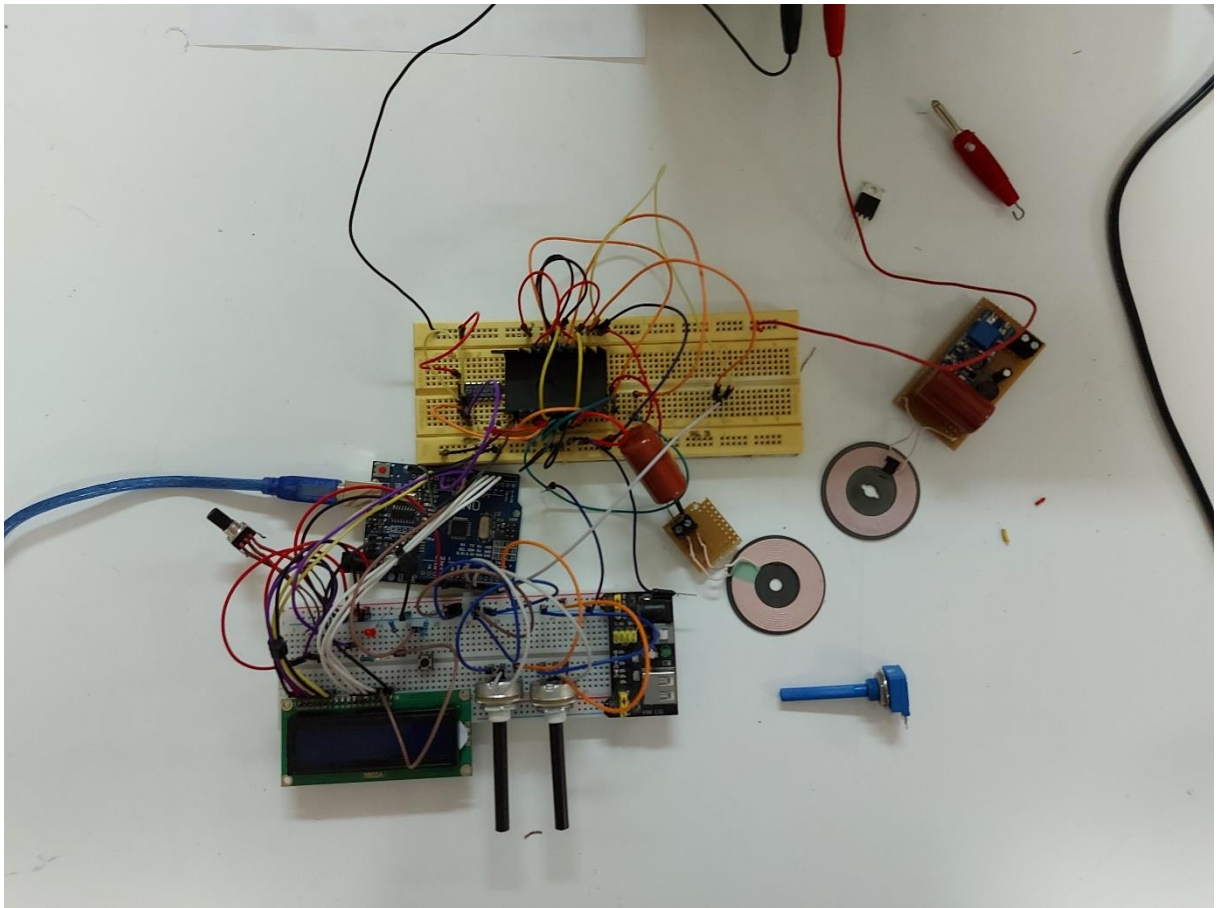


Figura 48 – Montagem do modelo

4.3. Resultados Obtidos

Nesta secção são expostos os resultados provindos da medição da tensão e corrente na zona da carga do protótipo acima referido. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Eletrónica de Potência do Instituto Politécnico de Setúbal.

O equipamento de medição utilizado para a obtenção destes valores foram um multímetro e um osciloscópio como se encontra representado na Figura 49.

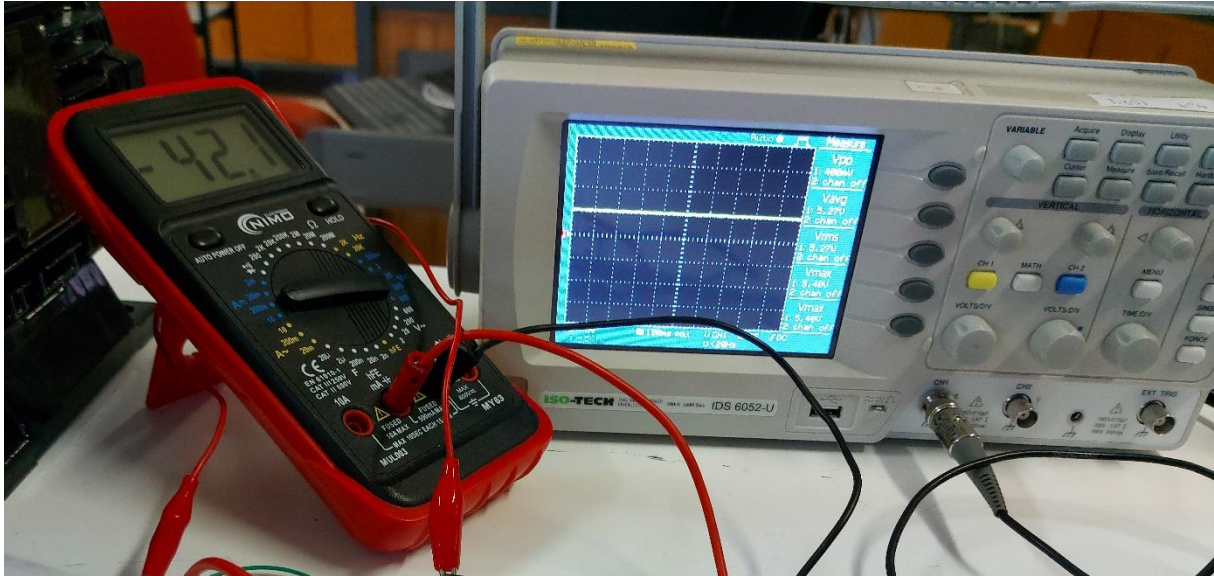


Figura 49 – Aparelhos de medida utilizados

Na entrada foi mantida uma diferença de potencial de 5V e uma intensidade de corrente máxima de 1A, tendo este uma potência máxima total de 5W.

O protótipo em questão foi sujeito a diferentes condições de funcionamento, aplicando às mesmas variações no sentido de validar o seu funcionamento e limites.

Estas condições de funcionamento são:

- Frequência;
- Distância;
- Desvio;

A variação da frequência de entrada do protótipo teve um intervalo de 3kHz, tendo este início em 36kHz e fim em 39kHz. Para a definição desta frequência foi utilizado o potenciômetro presente no protótipo que variava o valor da função `tone()` acima mencionada em 5.3.3. e com auxílio do ecrã LCD.

A variação da distância e do desvio foram feitas consoante apresentado nas Figura 50 e Figura 51.

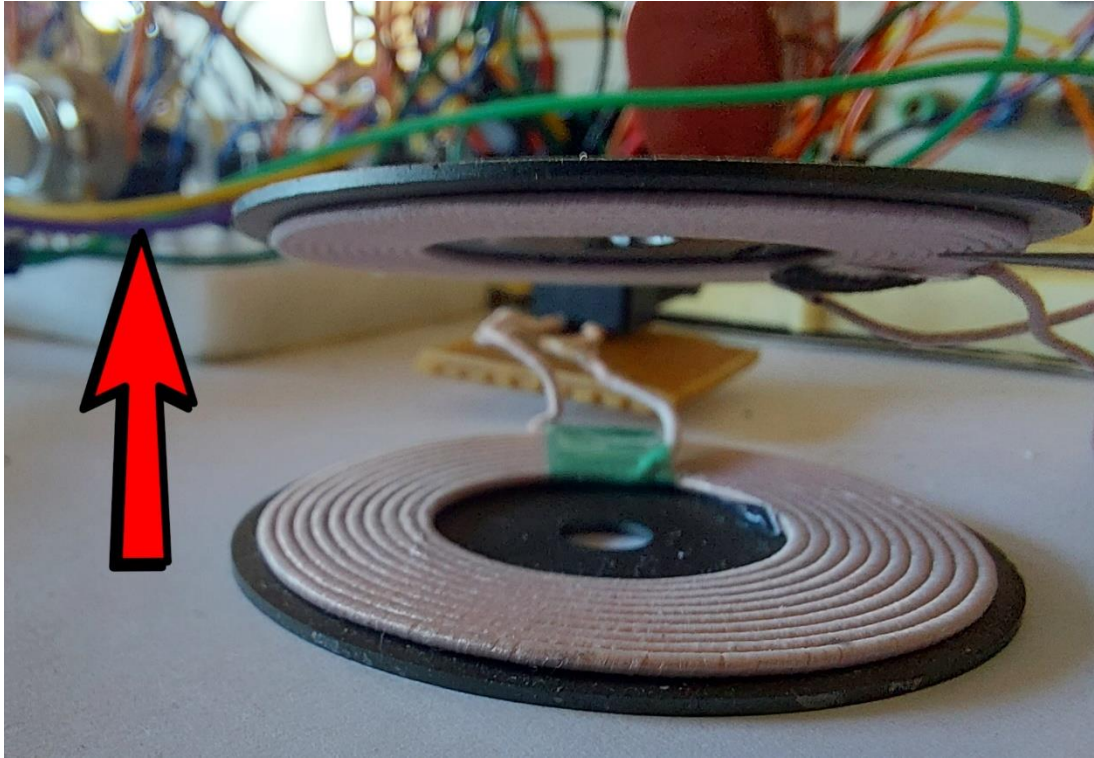


Figura 50 – Variação de distância entre bobinas

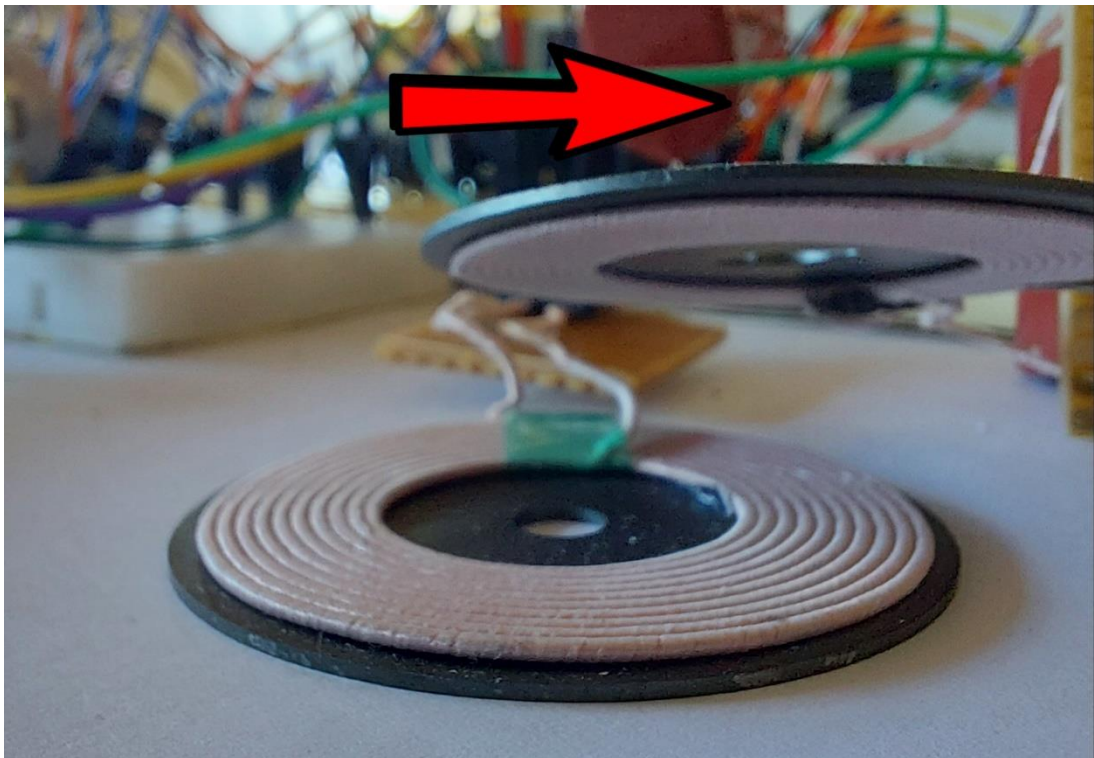


Figura 51 – Variação de desvio entre bobinas

De modo a obter consistência durante os ensaios, foram utilizados dois suportes de acrílico em cada bobina, semelhante ao representado nas Figura 52 e Figura 53, durante a medição destes parâmetros.



Figura 52 – Suporte de acrílico utilizado

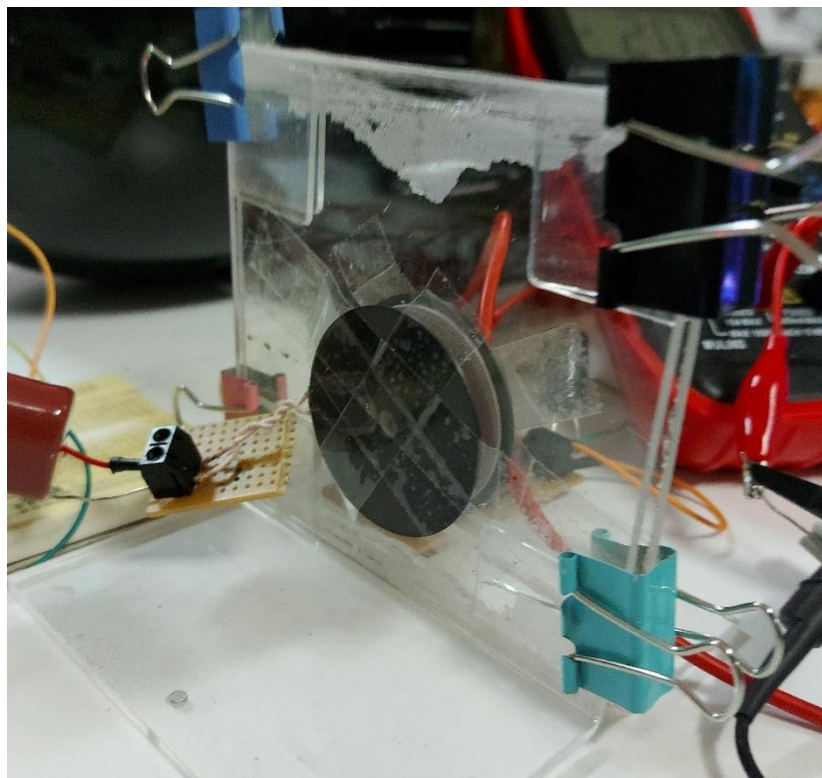


Figura 53 – Suporte de acrílico com bobinas

Foram considerados como limite máximo, para distância 1,05 cm, e desvio 0,5 cm devido à falta de aquisição de valores significativos assim que este algum destes valores era superado. A realização do ensaio encontra-se representada na

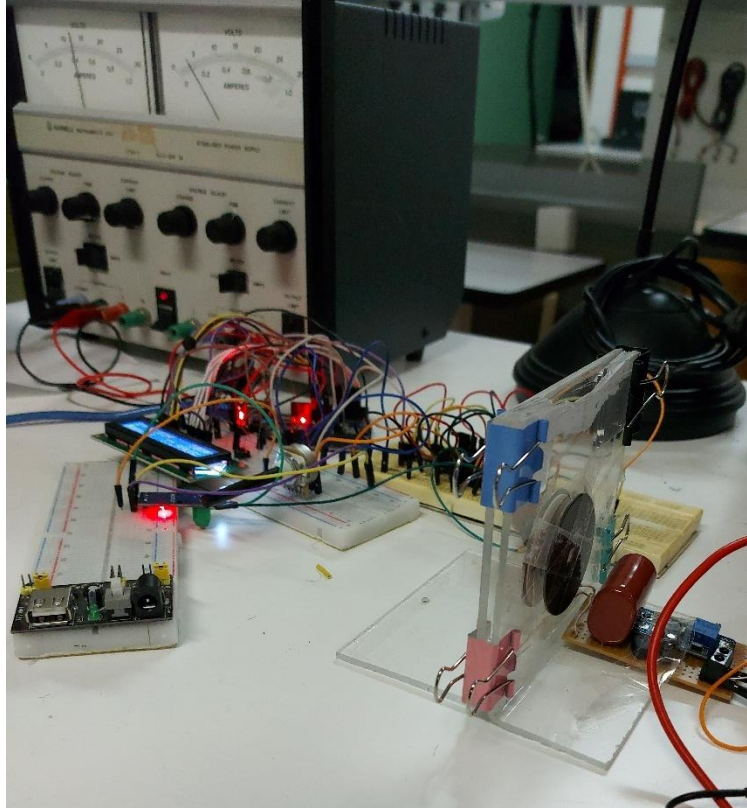


Figura 54 – Ensaio experimental

Os resultados para a diferença de potencial e intensidade de corrente para as diferentes condições e características das bobinas estão apresentados nas seguintes tabelas.

Tabela 4 – Tabela de resultados 1

Frequência 36k (Hz)	Desvio 0 cm	DISTÂNCIA (cm)	CORRENTE (mA)	TENSÃO (V)
		0,6	39,6	5
		0,75	17	2,53
		0,9	11	1,8
		1,05	6,5	1,43
	Desvio 0,25 cm	DISTÂNCIA (cm)	CORRENTE (mA)	TENSÃO (V)
		0,6	35	4,4
		0,75	15	2,33
		0,9	8,8	1,61
		1,05	6	1,3
	Desvio 0,5 cm	DISTÂNCIA (cm)	CORRENTE (mA)	TENSÃO (V)
		0,6	24	3,2
		0,75	10	2
		0,9	6,7	1,36
		1,05	4,3	1,2

Tabela 5 - Tabela de resultados 2

Frequência 37k (Hz)	Desvio 0 cm	DISTÂNCIA (cm)	CORRENTE (mA)	TENSÃO (V)
		0,6	43	5,4
		0,75	33	4,2
		0,9	18	2,68
		1,05	12,4	2,07
	Desvio 0,25 cm	DISTÂNCIA (cm)	CORRENTE (mA)	TENSÃO (V)
		0,6	40	5,1
		0,75	25	3,32
		0,9	13	2,16
		1,05	10	1,8
	Desvio 0,5 cm	DISTÂNCIA (cm)	CORRENTE (mA)	TENSÃO (V)
		0,6	34	4,42
		0,75	18,5	2,6
		0,9	11	2
		1,05	9,6	1,74

Tabela 6 - Tabela de resultados 3

Frequência 38k (Hz)	Desvio 0 cm	DISTÂNCIA (cm)	CORRENTE (mA)	TENSÃO (V)
		0,6	39,9	5
		0,75	36	4,5
		0,9	24	3,2
		1,05	18,8	2,75
	Desvio 0,25 cm	DISTÂNCIA (cm)	CORRENTE (mA)	TENSÃO (V)
		0,6	39	4,8
		0,75	27	3,69
		0,9	20	2,81
		1,05	17,5	2,57
	Desvio 0,5 cm	DISTÂNCIA (cm)	CORRENTE (mA)	TENSÃO (V)
		0,6	31,6	4,1
		0,75	20,6	2,9
		0,9	16	2,4
		1,05	15,9	2,4

Tabela 7 - Tabela de resultados 4

Frequência 39k (Hz)	Desvio 0 cm	DISTÂNCIA (cm)	CORRENTE (mA)	TENSÃO (V)
		0,6	35,7	4,54
		0,75	32	4,1
		0,9	21	2,93
		1,05	24	3,8
	Desvio 0,25 cm	DISTÂNCIA (cm)	CORRENTE (mA)	TENSÃO (V)
		0,6	29	3,5
		0,75	20	2,9
		0,9	17	2,61
		1,05	20	3
	Desvio 0,5 cm	DISTÂNCIA (cm)	CORRENTE (mA)	TENSÃO (V)
		0,6	19,8	2,8
		0,75	16,2	2,43
		0,9	15	2,32
		1,05	17,3	2,56

Tabela 8 - Tabela de potência para diferentes parâmetros

Distância (cm)	Potência (mW)											
	Desvio = 0 (cm)				Desvio = 0,25 (cm)				Desvio = 0,5 (cm)			
	0,6	0,75	0,9	1,05	0,6	0,75	0,9	1,05	0,6	0,75	0,9	1,05
Frequência 36kHz	198	43,0	19,8	9,2	154	34,9	14,1	7,8	76,8	20	9,1	5,1
Frequência 37kHz	232	138	48,2	25,6	204	83	28	18	150,2	48,1	22	16,7
Frequência 38kHz	199	162	76,8	51,7	187	99	56,2	44,9	129	59,7	38,4	38,1
Frequência 39kHz	162	131	61,5	91,2	101,5	58	44,3	60	55,4	39,3	34,8	44,2

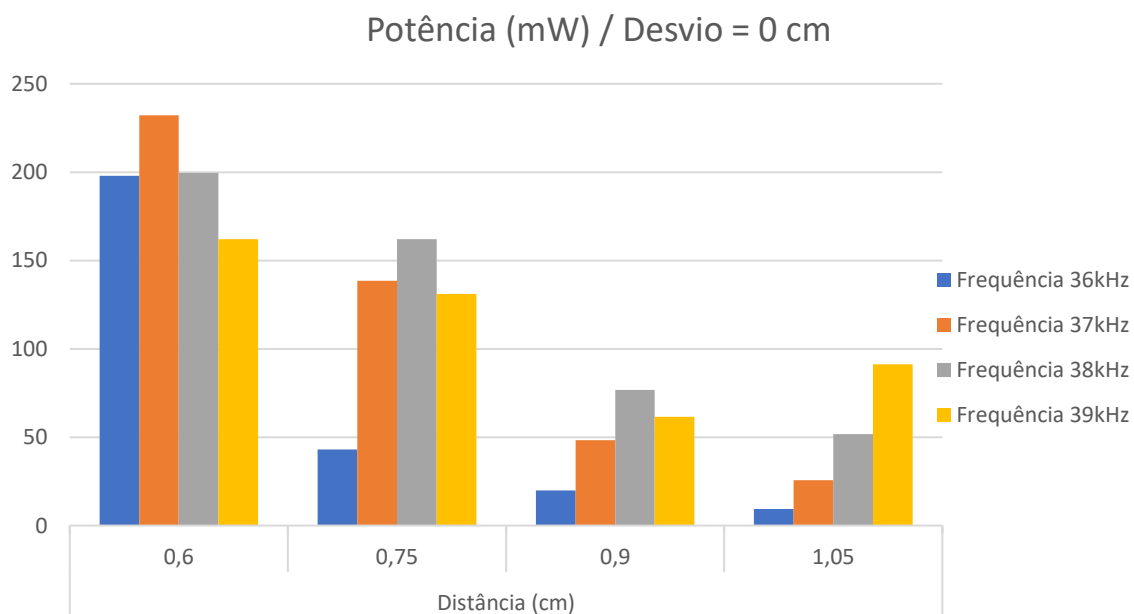


Figura 55 – Gráfico de potência para 0 cm de desvio.

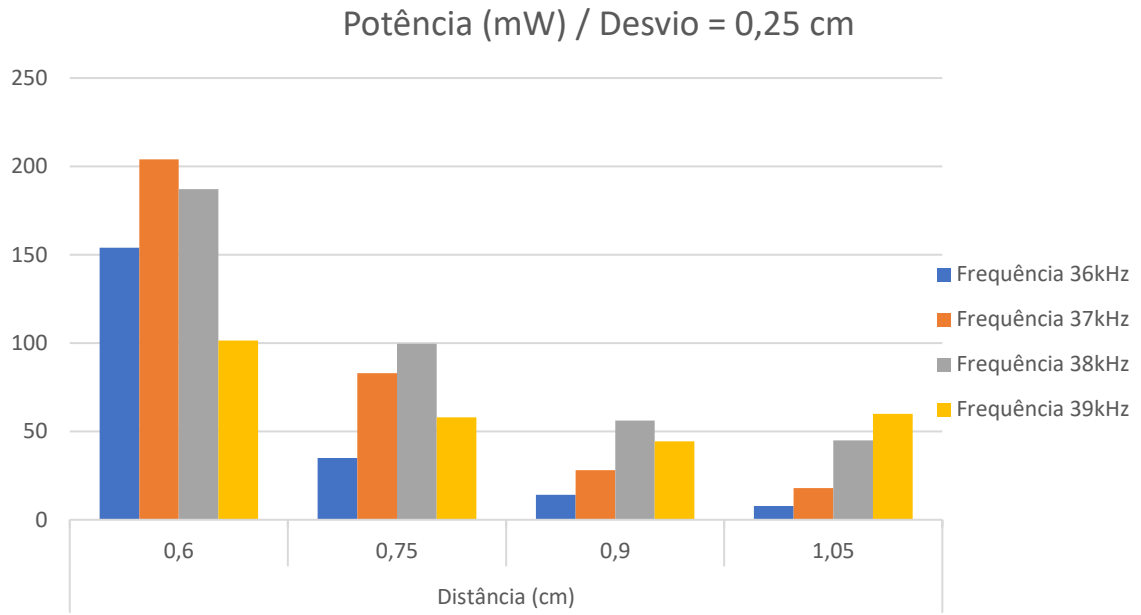


Figura 56 - Gráfico de potência para 0,25 cm de desvio.

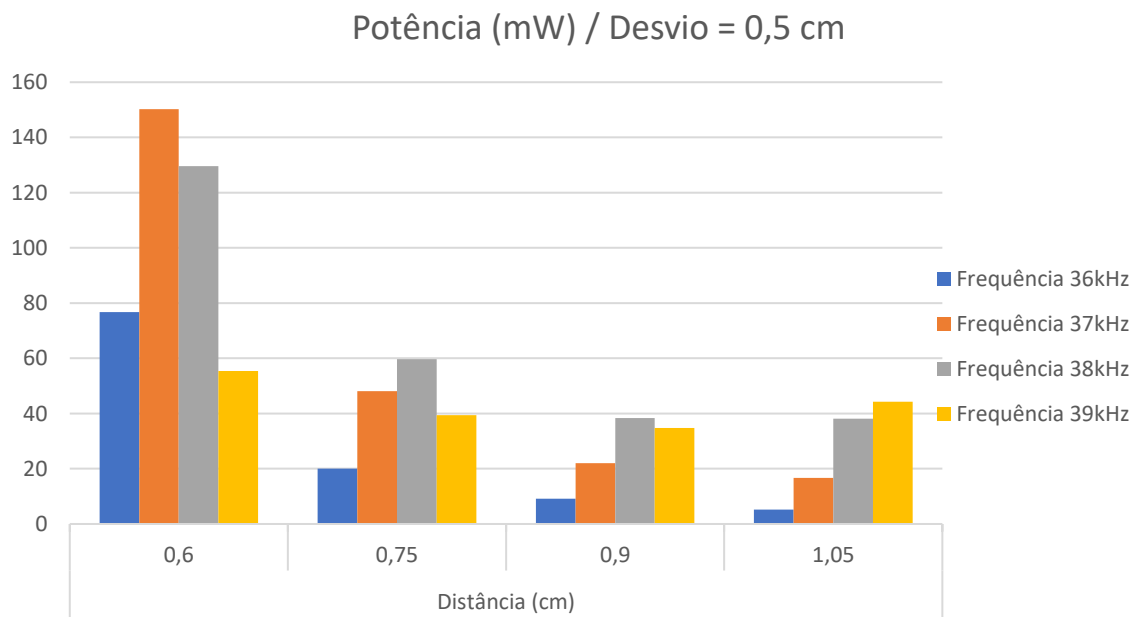


Figura 57 - Gráfico de potência para 0,25 cm de desvio.

Os resultados obtidos da fase experimental do protótipo são apresentados nas tabelas (3, 4, 5, 6, 7 e 8).

Uma variação nas variáveis propostas (distância e desvio) é acompanhada pela redução do coeficiente de acoplamento magnético, e conseqüentemente, uma alteração na frequência de ressonância.

Para uma análise conclusiva do ensaio, foram calculados os valores de potência correspondentes, tendo por base os valores obtidos anteriormente das correntes e tensões presentes na carga do circuito.

A Figura 55, Figura 56 e Figura 57 demonstra a variação de potência transferida nas várias condições apresentadas, nestes gráficos é possível observar a variação do ponto ótimo ao longo da distância, nota-se que com o aumento da distância este a frequência na qual o circuito funciona com maior potência também aumenta, o que concorda com o segundo parágrafo.

Como era esperável a potência diminui de um modo significativo com o aumento da distância entre as bobinas. O ponto máximo encontra-se na frequência de 37kHz para um desvio de 0 cm e uma distância de 0.6 cm.

Apesar da reduzida eficiência do circuito em questão, este apresenta um comportamento concordante com o previsto no enquadramento teórico. Considera-se então o segundo objetivo desta dissertação concluído.

Capítulo 5

Conclusões

5.1. Consideração finais

O principal objetivo desta dissertação trata-se do estudo da técnica de transmissão de energia sem fios por acoplamento indutivo ressonante. De modo a complementar os objetivos anteriores, realizou-se em primeiro lugar uma revisão de literatura da temática em questão partindo de uma análise generalizada como o estado da arte, e seguindo análise mais focada como o estudo das equações e leis inerentes. Esta revelou-se imprescindível na apuração dos vários processos presentes nos capítulos seguintes.

Um dos aspetos que marcaram este trabalho foi a realização e ensaio de um protótipo do modelo de acoplamento indutivo ressonante. Este, visa provar o conceito teórico anteriormente estabelecido na simulação e na sua conceção, ou seja, serviu de demonstração que a ideia de transferência de energia sem fio imposta na fase teórica é efetivamente possível. Pode-se então denominar a solução prática apresentada como, prova de conceito.

Durante o desenvolvimento e experimentação protótipo foram consideradas os aspetos que em seguida se enumeram:

- A potência máxima do circuito;
- O ponto ótimo do circuito ressonante;
- A configuração planar do circuito ressonante;
- A acessibilidade do protótipo;
- A qualidade do sinal de saída;

Os resultados obtidos foram satisfatórios, tendo em conta a natureza do circuito de WPT, comprova-se então possível a implementação de um sistema de transferência de energia sem fios dentro das condições expostas nas tabelas 4, 5, 6, 7 e 8.

Serve também a presente dissertação como, demonstração das dificuldades existentes ao implementar um sistema de WPT e o seu potencial.

5.2. Implicações pessoais

Esta dissertação serviu para a conquista de conhecimento na área de eletrotécnia, através da leitura e pesquisa realizadas. O método de pesquisa sempre foi um aspeto importante tanto na forma de estudo, mas também como característica em ambiente profissional.

Na perspetiva de formação, revela-se bastante pertinente como um mecanismo de reflexão, levando à melhoria da prática de ensino. De modo a melhorar a eficiência é preciso estar em constante aprendizagem.

5.3. Limitações ao estudo

É de salientar que esta dissertação apresenta limitações quanto à intenção de simulação o coeficiente de indução mútua das bobinas. Sendo este um parâmetro que depende de características tais como o coeficiente de acoplamento que representa a percentagem do fluxo produzido na Tx e aproveitado na Rx. Este coeficiente de acoplamento por sua vez depende da distância entre Tx e Rx e das suas posições em relação à outra, tornando-se então muito difícil simular estes valores. Deste modo, a simulação realizada no capítulo quarto não serviu para fazer uma análise comparativa com o protótipo, mas sim como guia teórico do mesmo.

5.4. Trabalho futuro

De acordo com a lei da indução mútua (3.16) e o circuito proposto na figura 15, é possível concluir que a frequência de ressonância varia com a distância entre os circuitos ressonantes. É importante manter esta frequência para de modo a maximizar a corrente e, conseqüentemente, o fluxo gerado pela bobina, aumentando assim o rendimento do circuito.

Uma proposta de trabalho futuro seria a construção de um sistema assistido por um algoritmo, que monitoriza a corrente máxima do circuito, ajustando a sua frequência de ressonância automaticamente.

Anexo 1

Fundamentos Teóricos

Leis de Maxwell

Estas equações são, a Lei de Gauss que descreve o campo elétrico gerado por cargas [7]:

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{A1.1})$$

Sendo:

- ρ a densidade volumétrica de cargas;
- ϵ_0 a constante de permissividade no vácuo;

A Lei de Gauss magnética, que afirma que um campo magnético B tem divergência nula:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{A1.2})$$

Sendo:

- \vec{B} o campo magnético;

A Lei de Faraday – Lenz, descreve a geração de corrente elétrica proveniente do campo elétrico gerado pelo fluxo magnético variante num fio.

$$\operatorname{div} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{A1.3})$$

Sendo:

- \vec{E} o campo elétrico
- \vec{B} o campo magnético.

Por último, a Lei de Ampère - Maxwell expressa que se existe corrente elétrica, será gerado um campo magnético em seu redor:

$$\operatorname{div} \vec{B} = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{A1.4})$$

Sendo:

- \vec{E} o campo elétrico;
- \vec{B} o campo magnético;
- μ_0 a permeabilidade no vácuo;
- ϵ_0 a constante de permissividade no vácuo;
- J a densidade de corrente;

Magnetismo

O fenómeno do magnetismo apareceu com a observação dos ímãs naturais há mais de 2000 anos. Um íman possui 2 polos, nomeadamente um polo norte e um polo sul. A força magnética possui uma maior intensidade nos extremos. Tal como acontece com as cargas elétricas, polos contrários ficam sujeitos a uma força de atração, enquanto dois polos do mesmo nome ficam sujeitos a uma força de repulsão. Os ímanes sempre existem aos pares, isto leva a que as linhas de força do campo magnético sejam linhas fechadas que se começam no polo norte e terminam no polo Sul, ao contrário das cargas elétricas em que existe a possibilidade de isolar as positivas das negativas.

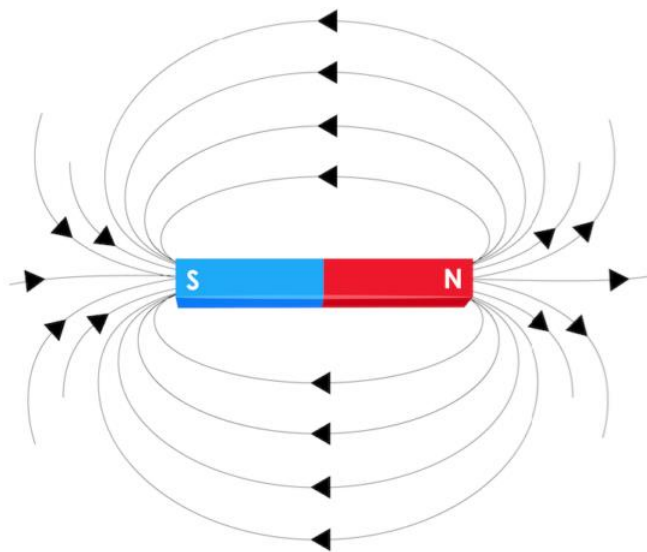


Figura 58 - Representação das linhas do campo magnético

Uma das características destas linhas é que elas nunca se cruzam, e o local onde existe uma maior densidade das linhas de força do campo magnético é onde este possui maior intensidade, nos polos do íman norte e sul.

Força magnética

O modelo teórico de magnetismo proposto por ampere pode ser resumido da seguinte forma: A origem do campo magnético são cargas elétricas em movimento. A interação magnética básica é a força magnética, esta resulta da interação de uma carga elétrica animada de uma determinada

velocidade com um campo magnético. É dada pela expressão e denominada por força de Lorentz:

$$\vec{F} = q\vec{V} \wedge \vec{B} \quad (A1.5)$$

Sendo:

- q a carga
- \vec{V} a velocidade
- \vec{B} o campo

O sentido da força depende do sinal da carga e pode ser obtida pela regra da mão direita.

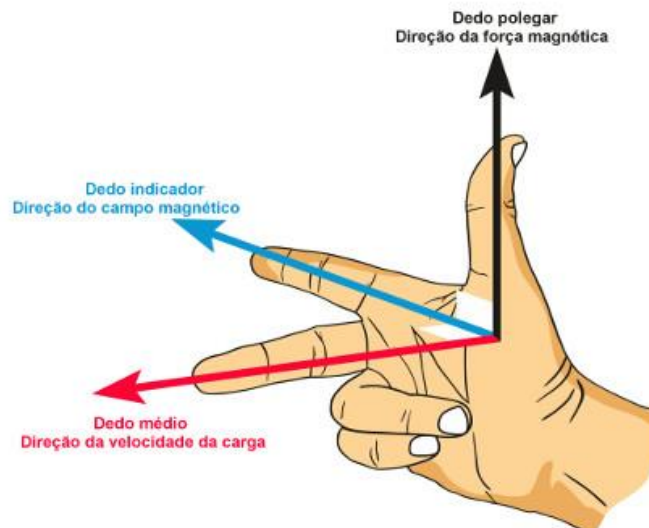


Figura 59 - Representação da regra da mão direita [I4]

Campo magnético

Conforme enunciou André-Marie Ampère, os campos magnéticos são gerados por correntes elétricas ou cargas em movimento. Através produto vetorial entre \vec{U}_r e $q\vec{V}$ é possível o campo magnético gerado por uma carga animada de uma determinada velocidade. O valor de campo magnético é dado pela seguinte expressão:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \times \frac{q\vec{V} \wedge \vec{U}_r}{r^2} \quad (\text{A1.6})$$

Sendo:

- r a distância entre a carga e o ponto do campo
- q a carga
- \vec{V} a velocidade
- \vec{B} o campo magnético
- μ_0 a permeabilidade magnética

\vec{U}_r representa um versor que indica o sentido onde se pretende calcular o valor do campo magnético

Novamente pela regra da mão direita é possível obter o sentido do vetor campo magnético.

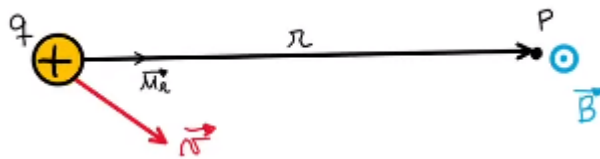


Figura 60 - Representação da direção do campo magnético

Caso seja um fio condutor a ser percorrido por uma determinada intensidade de corrente elétrica, é possível calcular o campo magnético criado por este mesmo fio em qualquer ponto P através da lei de Bio Savart. O valor do campo magnético é então dado pela seguinte expressão:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \times \frac{d\vec{l} \wedge \vec{U}_r}{r^3} \quad (\text{A1.7})$$

Sendo:

- r a distância entre a carga e o ponto do campo
- q a carga

- \vec{V} a velocidade
- \vec{B} o campo magnético
- μ_0 a permeabilidade magnética
- $d\vec{l}$ um comprimento infinitesimal do fio com direção da corrente
- I a corrente;

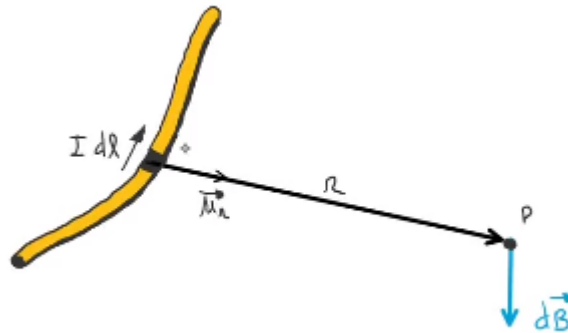


Figura 61 - Representação da direção do campo magnético quando um fio é percorrido por uma corrente elétrica

A unidade de campo magnético no sistema internacional é o Tesla.

Permeabilidade magnética

O parâmetro, permeabilidade magnética é uma constante, representado por μ_0 e presente na lei de Bio Savart, que relaciona o campo magnético num ponto com o meio, que para o caso do vazio, tem o valor de $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} T.M.A^{-1}$. Para um determinado meio utiliza-se a seguinte expressão:

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (A1.8)$$

Sendo:

- μ_r a permeabilidade relativa que é um valor adimensional;

Para a permeabilidade de diferentes categorias de materiais, existem 3 casos que devemos considerar, isto é, há 3 grandes grupos que os distinguem:

- Materiais diamagnéticos $\mu_r \geq 1$
- Materiais paramagnéticos $\mu_r > 1$
- Materiais ferromagnéticos $\mu_r \gg 1$

Os materiais ferromagnéticos são muito utilizados nos núcleos dos transformadores pois estes servem para concentrar as linhas de força do campo magnético.

Lei de Faraday

Até agora foi visto que os campos magnéticos são gerados por correntes elétricas, em consequência de cargas em movimento. Faraday chegou à conclusão de que o inverso se verifica, ou seja, sempre que uma mudança constante de fluxo magnético, uma força eletromotriz seria induzida, que por sua vez provocaria uma corrente induzida em qualquer circuito fechado. Esta apuração de Faraday é conhecida pela sua lei, a lei de Faraday-Neumann-Lenz ou lei da indução de Faraday que é traduzida matematicamente pela seguinte expressão:

$$E = - \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (\text{A1.9})$$

Sendo:

- E a força eletromotriz induzida;
- $d\Phi_m$ a variação de fluxo magnético;

O fluxo magnético diz respeito à grandeza matemática que corresponde ao número de linhas de força de um campo magnético que passam por uma determinada superfície. No caso particular de um campo magnético com linhas de força uniformes, o fluxo magnético é dado pela expressão:

$$\Phi_m = BA \cos \theta \quad (\text{A1.10})$$

Sendo:

- B o campo magnético;
- A a área da superfície;

- θ o ângulo entre as linhas de campo e a normal da superfície;

Dada a natureza da expressão matemática podemos concluir que neste caso em particular, o fluxo magnético é máximo quando o campo magnético está paralelo à normal da superfície, ou apenas, perpendicular à própria superfície.

Lei de Lenz

Esta lei representa a conservação de energia e justifica o sinal negativo que está presente lei de Faraday. Segundo esta lei, o fluxo magnético que origina uma corrente elétrica, é afetado de forma negativa pelo fluxo criado por esta mesma corrente. Isto deve-se ao sentido da corrente originada. A figura, traduz este fenómeno.

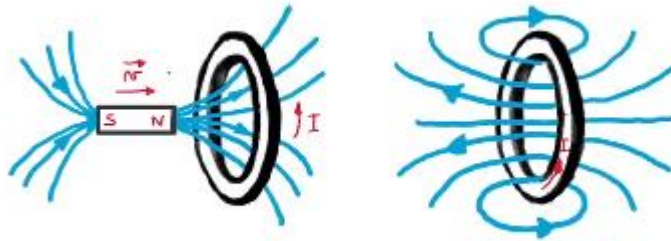


Figura 62 - Representação da lei de Lenz

O fluxo na espira aumenta, o que faz com que haja uma corrente induzida nesta mesma espira. Esta corrente induzida vai ter tal sentido que vai criar um campo magnético que irá contrariar a força que a criou. Esta corrente que vai ser produzida na espira, tem um sentido tal que o campo magnético que ela gera é contrário aquele que a está a criar.

Bobinas

Coeficiente de autoindução

Uma bobina é apenas um fio condutor enrolado sob a forma helicoidal

Qualquer circuito elétrico irá gerar um campo magnético quando percorrido por uma corrente elétrica, que por sua vez gera um fluxo magnético delimitado pelo próprio circuito.

Á constante de proporcionalidade deste fluxo magnético e a corrente elétrica percorrida pelo circuito é chamada de coeficiente de autoindução, sendo a sua unidade no sistema internacional o Henry, e é representado pela seguinte formula:

$$L = \frac{\Phi_{mag}}{I} \quad (A1.11)$$

Sendo:

- Φ_{mag} o fluxo magnético;
- I corrente elétrica;

Este fenómeno de autoindução ocorre em todo o circuito, mas é de particular importância nas bobines, pois na maioria dos casos é desprezável.

Coeficiente de autoindução de uma bobina

Uma bobina é caracterizada pelo seu número de espiras, área da sua secção transversal e comprimento. Para poder considerar uma bobina como ideal, ou seja, o campo magnético dentro da bobina é paralelo ao seu eixo, as linhas de força terão de ser paralelas ao eixo da bobina, a condição necessária para que a bobina seja ideal, o comprimento da bobina ser muito superior ao raio da espira.

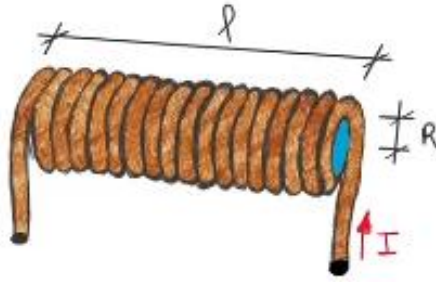


Figura 63 - Representação de uma bobina com n número de espiras

Depois de verificada esta condição, a seguinte expressão poderá ser usada para determinar o campo magnético gerado numa bobina quando esta é percorrida por uma corrente elétrica:

$$B = \mu_0 n I \quad (\text{A1.12})$$

Sendo:

- I a corrente elétrica;
- n a densidade de espira, ou seja, o número de espira por comprimento;
- μ_0 a permeabilidade magnética;

Considerando uma bobina ideal, quando as linhas de força do campo magnético são perpendiculares à superfície, o fluxo magnético no seu interior através das suas “N” espiras, é máximo e dado por:

$$\Phi_m = N B A \quad (\text{A1.13})$$

Sendo:

- B o campo magnético;
- A a área da superfície;
- N o número de espiras;

Podemos então deduzir que:

$$\Phi_m = N \mu_0 n I A$$

$$\Phi_m = n l \mu_0 n I A$$

$$\Phi_m = l\mu_0 n^2 IA \quad (\text{A1.14})$$

Por definição o termo coeficiente de autoindução, era o termo de proporcionalidade entre o fluxo magnético e a intensidade de corrente. Então obtenho simplesmente:

$$L = \frac{\Phi_{mag}}{I} = l\mu_0 n^2 A \quad (\text{A1.15})$$

Sendo esta a expressão que me permite determinar o coeficiente de autoindução de uma bobina. Este depende exclusivamente de parâmetros construtivos.

Com esta dedução a lei de Faraday pode tomar agora o aspeto:

$$E = -L \frac{dI}{dt} \quad (\text{A1.16})$$

Indução mútua

Duas bobinas com número de voltas, N1 e N2 respetivamente. Devido a I1 percorrer a bobina 1, será gerado um fluxo magnético Φ_1 . Digamos que Φ_{12} representa o fluxo da bobina 1 que interage com o circuito 2. Se a corrente variar no tempo, pela lei de Faraday, podemos dizer que a tensão na bobina 2 é dada por:

$$V2 = -N2 \frac{d\Phi_{12}}{dt} \quad (\text{A1.17})$$

A tensão gerada na bobina 2 é proporcional variação de corrente na bobina 1, então:

$$V2 = -M \frac{di}{dt} \quad (\text{A1.18})$$

Desenvolvendo:

$$-N2 \frac{d\Phi_{12}}{dt} = -M \frac{di}{dt}$$

$$-N_2\phi_{12} = -MI$$

$$M = \frac{N_2\phi_{12}}{i_1} \quad (\text{A1.19})$$

A equação (A1.19) representa a indução mútua para a corrente na bobina 1.

De maneira semelhante se existir um corrente na bobina 2 a expressão de M em função de I2 será:

$$M = \frac{N_1\phi_{21}}{i_2} \quad (\text{A1.20})$$

Coeficiente de acoplamento magnético

O coeficiente de acoplamento magnético representa a fração fluxo que atravessa a outra bobina. Este coeficiente varia entre 0 e 1 ou sem acoplamento e acoplamento total respectivamente. Podemos utilizar a seguinte expressão para determinar o coeficiente de acoplamento magnético:

$$k = \frac{\phi_{12}}{\phi_1} = \frac{\phi_{21}}{\phi_2} \quad (\text{A1.21})$$

Ressonância

Os circuitos que contêm os componentes como indutores e condensadores, possuem uma propriedade única de ressonância a uma determinada frequência precisa denominada de frequência de ressonância. Um circuito LC é um circuito elétrico construído com um condensador denominado pela letra 'C' e um indutor denominado pela letra 'L' ligados.

LC Série

Em circuitos LC de configuração série, o condensador 'C' e indutor 'L' são ligados em serie como demonstra a Figura 64.

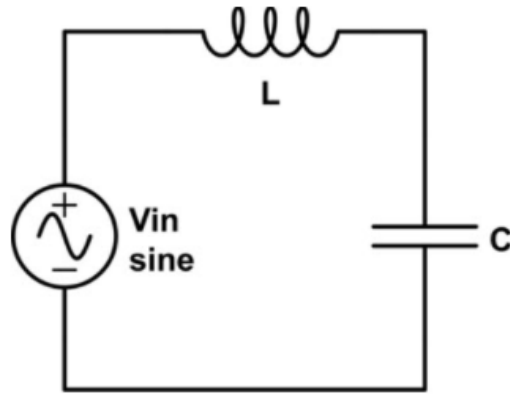


Figura 64 - Circuito LC série

A reactância indutiva X_L aumenta com a frequência. Da mesma maneira que a reactância capacitiva X_C diminui com a frequência.

Existe uma frequência específica onde as reatâncias X_L e X_C possuem o mesmo valor em magnitude. Esta frequência é designada de frequência de ressonância. Portanto em condições de ressonância

$$X_L = -X_C \quad (\text{A1.22})$$

$$\omega_L = \frac{1}{\omega_C} \quad (\text{A1.23})$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{A1.24})$$

Numa configuração série LC em condição de ressonância, as reatâncias X_L e X_C anulam-se. Nesta situação a única oposição à corrente do circuito será a resistência interna do circuito. Deste modo, a corrente máxima do circuito encontra-se dentro das condições de ressonância,

Anexo 2

Código Arduino

```
#include <LiquidCrystal.h>

LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);

float limiar = 0.3f, corrente = 1, freqAtual;

unsigned long tempoAnterior[5], tempoAtual;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  lcd.begin(16, 2);
  pinMode(A4, INPUT);
  pinMode(6, OUTPUT);
  pinMode(7, INPUT_PULLUP);
}

void loop()
{
  tempoAtual = millis();

  digitalWrite(6, HIGH);

  if(corrente < limiar)
  {
    sleep();
  }
  else
  {
    tone(9, freqAtual);
    delay(200);
    modo_f();
    lerCorrente();
  }

  lcdUpdate();
}

void sleep()
{
  tone(9, freqAtual);
  lerCorrente();
}
```

```

delay(500);

if(corrente < limiar)
{
  noTone(9);
  digitalWrite(6,LOW);
  delay(2000);
}

  tempoAtual = 0;

  return;
}
void lerCorrente()
{
  corrente = 0;

for(int i = 0; i < 1000; i++) {
  corrente = corrente + (.0264 * analogRead(A5) -13.51);
  delay(1);
}

corrente = corrente/1000;
Serial.print("Current :");
Serial.print(corrente);
Serial.println("A");
}
void lcdUpdate()
{

  if(atraso_f(0,200))
  {

    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("I= A");
    lcd.setCursor(2,0);
    lcd.print(corrente);

    lcd.setCursor(12,0);

    if(corrente < limiar)
    {
      lcd.print("Idle");
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd.print("-----");
      return;
    }
    lcd.print("On ");

    lcd.setCursor(0,1);

```

```

if(algoritmo)
{
  lcd.print("Auto  ");
}
else
  lcd.print("Manual  ");

  lcd.setCursor(8,1);
  lcd.print(freqAtual / 1000);
  lcd.setCursor(13,1);
  lcd.print("kHz");
}
}

void modo_f()
{
  if(digitalRead(7) == LOW)
  if(atraso_f(1, 1000))
  {
    tempoAnterior[1] = tempoAtual;
    algoritmo = !algoritmo;
  }

  manualFreq();
}

void manualFreq()
{
  freqAtual = analogRead(A1);
  freqAtual = map(freqAtual, 0,1023, 2000, 60000);
}

bool atraso_f(int i, int tempo)
{
  if(tempoAtual - tempoAnterior[i] >= tempo)
  {
    tempoAnterior[i] = tempoAtual;

    return true;
  }else{
    return false;
  }
}

```


Referências

Bibliográficas

- [1] Kepios, (2021), *Digital around the world*, Acedido em: 26 de Abril de 2021, em: <https://datareportal.com/global-digital-overview>
- [2] Kostakos, Vassilis, (2014), *Understanding Human-Smartphone Concerns*.
- [3] Wireless Power Consortium (2021), *Welcome to the Wireless Power Consortium*, Acedido em: 17 de Junho de 2021, em: <https://www.wirelesspowerconsortium.com/>
- [4] IEEE, (2021), *WPT History*, Acedido em: 10 de Junho de 2021, em: <https://wpt.ieee.org/wpt-history/>
- [5] Schuder, JD “*Powering na artificial heart: Birth of the inductively coupled-radio frequency system in 1960*”, *Artificial Organs* vol. 26, pp. 909-915
- [6] Schwan, Ma e Troyk, PR, “*Driver de alta eficiência para bobinas transutaneamente aopladas*” *IEEE Engineering in Medicine & Biology Society 11th Annual International Conference*, novembro 1989, pp. 1403-1404.
- [7] The Register. “*Pronto para outra guerra de patentes? A Apple ‘inventa’ o carregamento sem fio*”
- [8] Baikova, E. (2018), *Transferência de Energia sem contacto: Estudo das emissões do campo elétrico*, Tese de Doutoramento em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Universidade Nova de Lisboa – Faculdade de Ciências e Tecnologia. 187pp
- [9] Lafulla, E. (2020), *Xiami Mi Smart Tracking Charging Pad é a base de carregamento sem fio que suporta até 2 dispositivos*, Acedido em: 02 de Abril de 2021, em: <https://pt.xiaomitoday.it/xiaomi-mi-smart-tracking-charging-pad-e-la-base-di-ricarica-wireless-che-supporta-fino-a-2-device.html>
- [10] Nasa, administrador (2013), *LaserMotive Wins \$900,000 from NASA in Space Elevator Games*, Acedido em: 31 de Março de 2021, em: https://www.nasa.gov/centers/dryden/status_reports/power_beam.html
- [11] NeoScribe (2020), *How Wireless Charging For Electric Vehicles Will Solve Range Anxiety*, Acedido em: 02 de Abril de 2021, em: <https://www.youtubSe.com/watch?v=nq6e-0SRlz0>
- [12] Aguiar, J. (2013), *Transferência de Energia sem fios para carregamento de baterias*, Tese de Mestrado em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores, Universidade do Minho – Escola de Engenharia. 64pp
- [13] CarMagazine (2020), *New wireless electric car charging trial for Nottingham táxis*, Acedido em : 02 de Abril de 2021, em: <https://www.carmagazine.co.uk/electric/what-is-electric-car-wireless-charging-wevc-and-how-does-it-work-/>

- [14] Argarwal, K., Jegadeesan, R., Guo, Y., Thakor, N. (2017), *Wireless Power Transfer Strategies for Implantable Bioelectronics: Methodological Review*, Reviews in Biomedical Engineering. **16-18**.
- [15] Kostakos, Vassilis, (2014), *Understanding Human-Smartphone Concerns*.
- [16] Jawad Aqeel, Nordin Rosdiadee, Gharghan Sadik, Jawad Haider, Ismail Mahamod, (2017), *Opportunities and Challenges for Near-Field Wireless Power Transfer: A Review*.
- [17] Instituto de Eletrónica e Potência, Universidade Federal de Santa Catarina (2001), *Introdução aos Conversores CC-CC*
- [18] Codenço, G. (2015), *Tecnologia RFID: Caso de Estudo Aplicado à Logística Hospitalar*, Tese de Mestrado em Engenharia Biomédica e Biofísica Engenharia Clínica e Instrumentação Médica, Universidade de Lisboa – Faculdade de Ciências. 65pp
- [19] Fully Charged Show (2017), *Dynamic Electric Vehicle Charging | Fully Charged*, Acedido em: 02 de Abril de 2021, em: <https://www.youtube.com/watch?v=2t0E4AcVu6o>
- [20] Schwan, Ma e Troyk, PR, “*Driver de alta eficiência para bobinas transutaneamente aopladas*” IEEE Engineering in Medicine & Biology Society 11th Annual International Conference, novembro 1989, pp. 1403-1404.
- [21] FCT Nova (2019), Acedido em: 18 de Novembro de 2021, em: <https://www.fct.unl.pt/noticias/2019/06/fct-nova-com-postos-de-carregamento-para-veiculos-eletricos-funcionar-partir-de-1-de-julho>, “FCT Nova com postos de carregamento para veículos elétricos a funcionar a partir de 1 de Junho”.

IMAGENS:

- [I1] RFID: <https://nordvpn.com/wp-content/uploads/2020/06/RFID-blocking-featured.jpg>
- [I2] RFID2: <http://www.schmidt.com.cn/uploadfiles/2018/06/20180614160652652.png>
- [I3] Wireless: <https://b8s7f9a3.stackpathcdn.com/wp-content/uploads/2017/12/Untitled.jpg>
- [I4] Regra Mão direita: <https://s5.static.brasilecola.uol.com.br/img/2018/04/regra-da-mao-direita.jpg>
- [I5] Telemóvel: <http://ww1.bathroomsink.us/?z>
- [I6] Efeito pelicular: www.voltimum.pt/artigos/artigos-tecnicos/influencia-do-efeito
- [I7] Exemplos campo próximo e campo distante: <https://www.mdpi.com/1996->

1073/13/3/528/htm

[I8] Exemplo de etapas de carregamento de VE: <https://bijliwaligaadi.com/2019/12/electric-vehicle-future-technology-that-will-change-the-game.html>

[I9] Grafico fator de qualidade: Application note, Kabellose Energieübertragung, Würth Elektronik, *Die Spulen als zentrale Bauelemente*, 2013

[I10] Exemplo de ponte H:
https://static2.semikron.com/typo3temp/product_images/SEMIKRON_sk25mh120sctp-24920571_circuit.jpg

[I11] Onda Resultante apos filtragem: instrumentationtools.com_capacitor-filter-ripples.png
(929×492)